



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de Sistemas Electroópticos para Domótica y Señalización Vial

Autor:

Rodrigo Manzanares Bolea

Director:

Dr. José Manuel Sánchez Pena

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Leganés, junio 2010

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE SISTEMAS ELECTROÓPTICOS PARA DOMÓTICA Y SEÑALIZACIÓN VIAL

Autor: Rodrigo Manzanares Bolea

Director: José Manuel Sánchez Pena

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, de de

A mi padre

Agradecimientos

En primer lugar debo agradecer a José Manuel Sánchez Pena y a Carmen Vázquez el hecho de que me seleccionaran para dar clases en esta universidad hace ya casi 8 años, tiempo durante el cual no sólo he tenido un trabajo en un ambiente excepcional sino que también he podido completar mi formación conociendo a personas extraordinarias, algunas de las cuales paso a nombrar por haber formado parte de un periodo tan importante en mi vida: Víctor Zato, Julio Romeral, Carlos Macià, Marta Portela, Belén Arredondo, Silvia Pascual, Julio Montalvo, Rui Lemos, Cristina de Dios, Judith Liu, Almudena Lindoso, Vincent Cunningham, Virginia Urruchi, Pedro Contreras, Juan Carlos Torres, Noemí Gaona, Ricardo Vergaz, David Barrios, César Roda, Carlos Marcos, María Mariño, David Sánchez, Isidro Santos, Isabel Pérez, Juan Vázquez, Raúl Sánchez, Luis Mengibar, Michael García, Jesús Rubio, Daniel Gallego, Guillermo Guarnido, Julio Posada, Plinio Jesús Pinzón, Alberto Carrasco, Pedro Débora, etcétera.

También debo agradecer toda la ayuda y los consejos ofrecidos por los técnicos y secretarios de departamento, ya que sin ellos sería imposible llevar a cabo la labor del resto del personal del mismo.

Y por último, gracias a toda mi familia, especialmente a mi madre y a mi mujer, por haberme apoyado y animado siempre a seguir adelante.

Índice general

<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Índice general</i>	<i>v</i>
<i>Resumen</i>	<i>ix</i>
<i>Abstract</i>	<i>xiii</i>
<i>Lista de acrónimos</i>	<i>xvii</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>xix</i>
1 Introducción	1
1.1 Efectos electroópticos	2
1.2 Materiales cromogénicos	3
1.2.1 Cromogénicos activos eléctricamente	4
1.3 Diodos emisores de luz (LEDs)	9
1.3.1 Características de funcionamiento	10
1.3.2 Mercado de los LEDs	11
1.4 Mercado de dispositivos de señalización de vehículos	13
1.5 Motivación y objetivos	16

2 Desarrollo de un sistema domótico avanzado basado en ventanas

PDLC para aplicaciones en control de iluminación y privacidad __ 19

2.1	Caracterización de los componentes hardware del sistema	22
2.1.1	Modelado y caracterización de las ventanas PDLC	22
2.1.1.1	Modelado teórico	22
2.1.1.2	Caracterización experimental	27
2.1.2	Sistema de excitación de ventanas PDLC	33
2.1.3	Sensores	33
2.1.4	Transformador y relés	35
2.2	Diseño hardware del sistema	38
2.2.1	Sistemas de alimentación	38
2.2.2	Indicadores de estado del sistema	40
2.2.3	Excitación de las ventanas PDLC	41
2.2.4	Diseño de la PCB	42

3 Diseño del software para el control local del sistema domótico __ 49

3.1	Características funcionales del software desarrollado	50
3.2	Control remoto del sistema	55
3.3	Comunicación entre la MDA320 y el Flash	61
3.4	Comunicación entre el Flash y la MDA320	62

4 Desarrollo de un sistema visualizador basado en LEDs para vehículos especiales __ 63

4.1	Diseño físico y mecánico del sistema	64
4.2	Elección de componentes para el nuevo hardware	67
4.2.1	Elección de los LEDs	67
4.2.2	Elección de los componentes electrónicos	76
4.2.3	Elección del mando de control y electrónica asociada	79
4.3	Diseño electrónico y ensamblaje mecánico del sistema visualizador	83
4.4	Software de control del sistema visualizador	89
4.5	Montaje y pruebas del sistema visualizador. Resultados y discusión	101

5 Conclusiones, trabajos futuros y difusión y transferencia de resultados	107
5.1 Conclusiones	107
5.2 Trabajos futuros	110
5.3 Difusión y transferencia de resultados	111
Bibliografía	119

Resumen

El objetivo de este trabajo es diseñar, implementar y verificar dos sistemas electroópticos para dos ámbitos de aplicación diferenciados: domótica y señalización vial sobre vehículos. El primero de ellos es un sistema basado en paneles PDLC (*polymer-dispersed liquid crystals*) que es capaz de controlar la transmisión óptica entre varios niveles, tanto de forma manual como de forma remota. Este sistema permite que la activación o desactivación de dichos niveles se pueda realizar in situ mediante movimientos de la mano los cuales son detectados por sensores de presencia que incorpora el módulo de control. Adicionalmente, pueden también ser activados o desactivados de forma remota mediante una herramienta web diseñada al efecto.

Para proceder a su implementación, se seguirán los siguientes pasos o fases de desarrollo: (i) caracterización electroóptica de los paneles PDLC; (ii) diseño del driver de excitación de cada panel; (iii) diseño de los sistemas auxiliares —sensores de luz, presencia, gestión de las señales de excitación y activación de los sensores, etc.—; (iv) implementación del sistema global y, (v) verificación y evaluación de las prestaciones eléctricas y ópticas. Este sistema pretende superar restricciones de otros disponibles comercialmente basados en PDLC que sólo pueden operar entre dos niveles, opaco y transparente, permitiendo además una gran flexibilidad y confort en los mecanismos de manejo del mismo, lo que le convierte en un sistema

especialmente apto para aplicaciones en edificios inteligentes —oficinas, hoteles, centros de ocio, etc.— donde el aspecto de control de luz y control de privacidad puedan resultar de gran utilidad práctica.

Por lo que respecta al segundo sistema —puente de señalización para vehículos especiales—, se pretende completar todas las fases del ciclo industrial del producto: (i) diseño conceptual a nivel geométrico, mecánico, electrónico y óptico; (ii) implementación física; (iii) verificación funcional del sistema; (iv) homologación del mismo conforme a normativa vigente; (v) evaluación en condiciones de operación real y, (vi) transferencia al sector industrial para su eventual comercialización. Este sistema pretende mejorar aspectos de los tradicionales puentes basados en luces giratorias o elementos móviles —espejos, lentes, etc.— los cuales requieren un alto coste de mantenimiento y son muy ineficientes desde el punto de vista de consumo eléctrico.

Este trabajo de tesis se articula en 5 capítulos. Inicialmente, se describen las diferentes tecnologías de cromogénicos controlables eléctricamente —PDLCs, electrocrómicos y dispositivos de partículas suspendidas— utilizados en los sistemas comerciales más usados en el control de la transmisión de luz, destacando las ventajas e inconvenientes de unos frente a otros. A continuación se describirá el desarrollo hardware y software de dicho sistema y los resultados obtenidos.

La segunda parte de esta tesis se dedica al segundo sistema electroóptico desarrollado (puente de luces). La secuencia que se ha seguido para completar este prototipo se describe a continuación. Primeramente, se propone la estructura geométrica más adecuada desde el punto de vista aerodinámico y de facilidad de fabricación. Seguidamente, se diseña el sistema óptico basado en LEDs de alta eficiencia —sin elementos ópticos auxiliares— y el sistema de *drivers* para los LEDs. A continuación, se desarrolla el sistema de control tanto para la secuencia de luces como

para la sirena (sonido). Por último, se realizan las pruebas que corroboran su correcto funcionamiento conforme a normativa vigente y se procede a su documentación para su posterior homologación y transferencia al sector empresarial. El documento finaliza con un capítulo dedicado a las conclusiones más relevantes y a los trabajos futuros.

Abstract

The objective of the work presented in this dissertation has been to design, implement and verify two electro-optic systems for two different fields of application: domotics and vehicle based road signaling. The former is a system based on PDLC (polymer-dispersed liquid crystals) panels which are capable of controlling the optical transmission over different levels, both manually and remotely. This system permits the activation or deactivation of these different levels to be carried out in situ via movements of the hands which are detected by a proximity sensor incorporated along with a control module. Additionally, these can also be activated or deactivated remotely using a specifically designed web based tool.

To proceed with the implementation, the following steps or development stages have been considered: (i) electro-optic characterization of the PDLC panels; (ii) design of the driver for each panel; (iii) design of auxiliary systems —light and proximity sensors, signal control for excitation and activation of the sensors, etc.—; (iv) global implementation of the system and, (v) verification and evaluation of the electrical and optical performance. The objective of this system design is to overcome the restrictions presented by other commercially available devices based on PDLC which only operate between two levels, i.e. opaque & transparent, this novel system design will also provide much improved flexibility and

comfort regarding the control of the mechanisms, making this system especially suitable for applications in smart buildings —offices, hotels, entertainment centers, etc.— where the aspect of light and privacy control results in great practical use.

Regarding the second system —lightbars for specialized vehicles—, it is envisaged that all the stages of the industrial cycle of the product will be completed: (i) concept design regarding geometric structure, mechanics, electronics, and optics; (ii) physical implementation; (iii) functional verification of the system; (iv) homologation of the system under current regulations; (v) evaluation of the system in real operating conditions and, (vi) transfer to the industrial sector for its eventual commercialization. The aim of this system is to improve on traditional aspects of lightbars which are based on rotating lights or moving parts —mirrors, lenses, etc.— which require high cost maintenance and are also very inefficient from the point of view of electrical consumption.

This thesis is divided in 5 chapters. Initially, the different technologies will be described for electrically controllable chromogenics —PDLs, electrochromics and devices containing suspended particles— used in commercial systems which generally control the transmission of light, highlighting the advantages and disadvantages of each system. Following this is a description of the hardware and software development of this system and the results obtained.

The second part of this thesis is dedicated to the development of the second electro-optic system (lightbars) mentioned above. The order of actions which have been followed to complete this prototype will be described here. First of all, the most adequate geometric structure is proposed to complete this prototype from the point of view of aerodynamics and ease of fabrication. Secondly, the optical system that is based on high efficient LEDs has been designed —without any auxiliary

optical elements— along with the LED driver system. This is followed by the development of the control system for both the light sequence and the siren (sound). Finally, tests which have been carried out to corroborate the correct functioning of the system which conform to current rules and regulations will be presented. The next stage in the development process has been the documentation required for posterior homologation and transfer to the business sector. This document finishes with a chapter dedicated to the most relevant conclusions and future work.

Lista de acrónimos

ASCII	<i>Código estadounidense estándar para el intercambio de información</i>
BD	Base de Datos
CAD	<i>Diseño asistido por ordenador</i>
CEE	Comunidad Económica Europea
CIE	<i>Comisión internacional de iluminación</i>
CL	Cristal Líquido
EC	Electrocromico
EEUU	Estados Unidos
FLC	<i>Cristales líquidos ferroeléctricos</i>
FPGA	<i>Matriz de puertas programable</i>
GDAF	Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas
IR	Infrarrojo
ITO	<i>Óxido de indio y estaño</i>
JSP	<i>Páginas de servidor en Java</i>
LD	<i>Laser diode</i>
LED	<i>Diodo emisor de luz</i>

MDA	<i>Adquisición de datos multifunción</i>
MIB	<i>Placa de interfaz con mote</i>
MOSFET	<i>Transistor de efecto de campo basado en la estructura de metal y óxido de semiconductor</i>
NESC	<i>C para sistemas de red incrustados</i>
PCB	<i>Placa de circuito impreso</i>
PDA	<i>Asistente digital personal</i>
PDLC	<i>Cristal líquido disperso en polímero</i>
PWM	<i>Modulación por ancho de pulso</i>
RF	<i>Radiofrecuencia</i>
SPD	<i>Dispositivo de partículas suspendidas</i>
TCP	<i>Protocolo de control de transmisión</i>
TRIAC	<i>Triodo para corriente alterna</i>
TS	<i>Espectrómetro triple</i>
TV	Televisor
UV	Ultravioleta
XML	<i>Lenguaje de marcas extensible</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Demanda de vidrio inteligente en el mercado americano. Fuente: The Freedonia Group.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2. Funcionamiento de una ventana SPD en estado oscuro —desactivada— y en estado claro —activada—. Cortesía de CRICURSA Cristales Curvados S.A.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.3. Ejemplos de aplicaciones de SPD en el sector aeronáutico (Raytheon Aircraft) y de automoción (Mercedes y Lexus).</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.4. Comparativa de propiedades entre las diferentes tecnologías cromogénicas activadas eléctricamente.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.5. Volumen del mercado de LEDs en función del tipo de dispositivo. Fuente: Yole Développement.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1.6. Distribución del mercado de LEDs en función del tipo aplicación.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.7. Estimación del mercado de LEDs blancos para su utilización en iluminación. Fuente: Yole Développement.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.8. Productos que requieren el uso de LEDs.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.9. Puentes de luces de las series 7000/8000 de Federal Signal Vama.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.10. Puente de luces con LEDs de la firma Soundoff.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.1. Dispositivo PDLC en estado opaco y transparente.....</i>	<i>23</i>

<i>Figura 2.2. Eficiencia de scattering frente a a/λ para tres índices de refracción relativos, m, distintos.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.3. Señal de excitación aplicada a la muestra PDLC original obtenida con un osciloscopio digital Lecroy.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.4. Iluminancia medida tras la muestra de PDLC para distintas tensiones de excitación. La iluminancia total para cada tensión es el área de su respectiva curva.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.5. Desviación de la respuesta logarítmica presentada por la muestra de PDLC caracterizada.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.6. Curva de la intensidad luminosa a 600 nm que atraviesa la ventana cuando ésta se excita durante 3 ciclos de red y se deja los 2 siguientes en alta impedancia.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.7. Curva de la intensidad luminosa a 600 nm que atraviesa la ventana cuando ésta se alimenta durante 4 ciclos de red y se deja el siguiente en alta impedancia.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.8. Intensidad de corriente que atraviesa una muestra de PDLC en función de la tensión eficaz que se le aplica.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.9. Disposición de terminales y conexiones internas del relé G3VM-351G...41</i>	
<i>Figura 2.10. Esquema electrónico propuesto para el circuito de control de las ventanas de PDLC.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.11. Emplazamiento de los componentes en la PCB diseñada.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2.12. Montaje final del sistema domótico.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.1. Fotografía de un estor japonés colocado en una ventana. Nótese el control luminoso obtenido con el mismo.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.2. Entorno gráfico de la aplicación para control remoto mostrando el estado de inicialización.</i>	<i>57</i>

<i>Figura 3.3. Ejemplo de demostración de los diferentes estados de transparencia admitidos por la ventana de PDLC.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.4. Estructura del servidor.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.5. Diagrama de flujo de datos entre la MDA320 y el Flash.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.6. Diagrama de flujo de datos entre el Flash y la MDA320.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema de control del dispositivo de la invención.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.2. Vista en planta del dispositivo de la invención.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.3. Soporte para las lentes de los LEDs diseñado por la empresa MIL ASOCIADOS.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.4. Luz relativa emitida por Z-Power LEDs de diferentes colores de la serie P4 para una corriente de polarización de 350mA frente a la temperatura de su unión.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.5. Coordenadas cromáticas del tipo de LED utilizado marcadas con un punto azul sobre el triángulo de colores CIE, dentro de la zona delimitada por el reglamento con 3 rectas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.6. Comparación de la curva fotométrica utilizada en el laboratorio de homologación con las curvas de 1931 y de 1964.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.7. Disposición final de los LEDs y estimación de su rango de iluminación..</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.8. Diagrama de bloques del microcontrolador AT89C2051.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.9. Aspecto del mando de control diseñado.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.10. Placa de soporte para los módulos de LEDs y para la placa de control del sistema.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.11. Esquema de la placa de control de las luces de emergencia.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.12. PCB del sistema de control de las luces de emergencia.</i>	<i>85</i>

<i>Figura 4.13. Esquema del panel de control del puente de luces.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.14. PCB del panel de control del puente de luces.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.15. Diagrama de flujo del software de control del sistema visualizador.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.16. Diagrama de flujo que permite controlar todas las luces del puente.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.17. Representación de las 5 secuencias básicas de rotación con 4 bloques de luces.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.18. Representación de una serie de 5 secuencias de rotación errónea con 4 bloques de luces.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.19. Ventana que muestra el simulador de μVision siendo utilizado para depurar código.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.20. Prototipo de panel de control con indicadores encendidos y letras asignadas a cada botón.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.21. Prototipo de puente de luces en funcionamiento.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.22. Tensión directa de Z-Power LEDs de diferentes colores de la serie P4 frente a la corriente directa media a 25 °C.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.23. Corriente directa de Z-Power LEDs de diferentes colores de la serie P4 frente al flujo luminoso relativo que aportan a 25 °C.</i>	<i>105</i>

1

Introducción

La industria fotónica juega un papel central en afianzar las tecnologías de la información y comunicación, iluminación, producción industrial, y desarrollo de las ciencias de la vida y la salud. La fotónica es productor de innovación tecnológica con amplia influencia en muchos de los aspectos de la vida y debe ser uno de los motores de la competitividad industrial y tecnológica a nivel mundial. Un aspecto clave de las tecnologías de la luz es que, a causa de su carácter horizontal, facilitan la convergencia entre la sociedad industrial y la sociedad de la información. Podríamos decir que de la misma manera que el siglo XX fue el siglo del electrón, el siglo XXI podría ser el siglo del fotón.

Según la Real Academia Española, la palabra “domótica” proviene de “domus” —que significa casa en latín— y de “informática” [Rae10], palabra formada a partir de las palabras “información” y “automática” —que funciona por sí sola—. Así pues, se puede entender la domótica como el conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que pueden estar integrados por medio de redes interiores y exteriores de comunicación, cableadas o inalámbricas, y cuyo control goza de cierta ubicuidad, desde dentro y fuera del hogar [Wik10]. Existen dos conceptos inherentes asociados a la domótica: la integración de tecnología y el diseño

o control inteligente de un determinado recinto. Por tanto, se trata más bien de un concepto global de gestión técnica, en el que están involucrados los campos de gestión energética y del confort [Ver04]. En efecto, simultanear el control óptico y térmico de los recintos interiores permite ahorros energéticos considerables. Este proceso puede correr a cargo del usuario o bien ser realizado por el sistema de forma automática.

1.1 Efectos electroópticos

Existen algunas aplicaciones donde un control de la transmitancia —relación entre la cantidad de radiación que atraviesa un material y la que incide sobre él— o reflectancia —relación entre la luz que se refleja frente a la cantidad de luz incidente— puede suponer implicaciones no solo de tipo económico —ahorro energético— sino también afectar de forma irreparable a sistemas biológicos especialmente sensibles a la cantidad de luz recibida —sistemas láser para imagen médica, pinzas ópticas, etc.—. La forma de controlar este tipo de radiación está basada en el balance energético que tiene lugar en la interacción radiación-materia asociado a los siguientes efectos [Bor99]: transmisión, reflexión, *scattering* —o redistribución de la energía radiante por parte de la materia— y absorción. Definiendo cuatro coeficientes de potencia relacionados con los citados fenómenos — T , R , S , A — y, considerando una señal luminosa normalizada de potencia unidad, se puede establecer entre ellos la siguiente relación:

$$T + R + S + A = 1 \quad (1.1)$$

El efecto electroóptico que presentan algunos materiales consiste básicamente en que, mediante la aplicación de una señal eléctrica de excitación externa, se puede modificar alguno de los términos de la relación

anterior, si bien la suma de todos ellos debe permanecer constante [Hec97]. En términos prácticos, esto quiere decir que la cantidad de radiación a través de este tipo de materiales puede ser controlable eléctricamente, lo que puede facilitar la incorporación de los mismos a sistemas de control inteligentes más sofisticados, pasando a ser un elemento integrante más de la infraestructura domótica del recinto.

1.2 *Materiales cromogénicos*

En este ámbito, los materiales que pueden controlar selectivamente el espectro de una radiación en función de un determinado estímulo se les denomina cromogénicos [Lee02]. Estos materiales han sido profusamente investigados en las últimas décadas [Gra09, Pat09, Lon08, Wil74, Gra95] y su abanico de aplicaciones ha ido incrementándose de forma espectacular, convirtiéndose en un nicho de mercado (Figura 1.1) cada vez más importante en el ámbito de las denominadas “ventanas inteligentes” [Gra00, Deu09, Ver08].

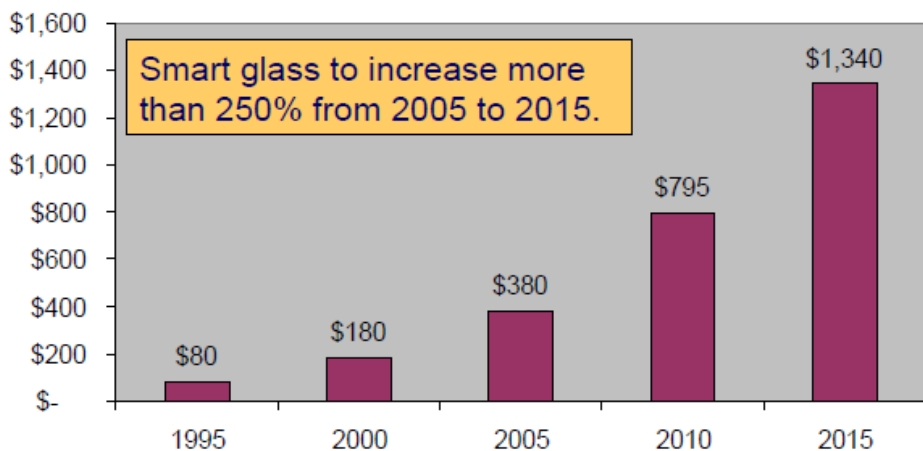


Figura 1.1. Demanda de vidrio inteligente en el mercado americano. Fuente: The Freedonia Group

Los materiales cromogénicos pueden dividirse en 2 categorías fundamentales:

- Pasivos, como los fotocromicos o los termocromicos.
- Activos, como los electrocromicos (EC), los cristales líquidos (CL) y los electroforéticos o de partículas suspendidas (SPD).

La diferencia fundamental entre ambas categorías es que los pasivos no involucran interfaces eléctricas mientras que los activos sí. Dicho de otro modo, los primeros no necesitan una señal eléctrica de excitación para variar su comportamiento espectral a diferencia de los segundos.

Los materiales fotocromicos reaccionan fundamentalmente a la presencia de luz UV. Se usan preferentemente en aplicaciones de pequeño formato —área activa pequeña— y su mercado actual se circunscribe fundamentalmente a las gafas de sol.

Los materiales termocromicos reaccionan a la presencia de calor y habitualmente contienen colorantes, tintes o pigmentos. Presentan alguna aplicación en el ámbito de aplicaciones de gran formato en arquitectura y transporte. Su volumen de ventas a nivel mundial es reducido en comparación con otras tecnologías de cromogénicos.

1.2.1 Cromogénicos activos eléctricamente

Este tipo de materiales, como se comentó previamente, necesitan la aplicación de un campo eléctrico para modificar su espectro de transmisión y, por tanto, variar la transmisión óptica de la luz incidente sobre ellos. Al necesitar una interfaz eléctrica, se pueden manejar de forma manual, automática y, excepcionalmente, pueden llevar un control integrado en la propia ventana o panel. La tecnología de este tipo de materiales no está aún

madura [Ric08, Bro95] y en los últimos años, algunos de ellos han sido intensamente investigados al objeto de mejorar sus prestaciones eléctricas —disminuir el consumo, disminuir las tensiones de conmutación, etc.— y ópticas —aumentar el nivel de transmisión en estado transparente, controlar no solo la luz sino también el calor, etc.—. Se pueden distinguir 4 grandes nichos de mercado para este tipo de materiales:

- Arquitectura
- Automoción
- Aeroespacial
- Sector marino

El uso de productos potenciales [Yu97] puede abarcar ventanas, puertas, techos, biombos en oficinas, fachadas, visores, cascos, gafas de sol, espejos retrovisores, filtros, displays, etc.

En el caso de dispositivos de CL o más concretamente de dispersiones de CL en polímero (PDLC), el balance o intercambio de potencia se realiza fundamentalmente entre los coeficientes S (*scattering*) y T (transmisión) de forma que el resultado neto es una conmutación posible entre un estado opaco —para S máximo y T mínimo— y un estado transparente —para T máximo y S mínimo— en función de la señal eléctrica externa aplicada al dispositivo.

Los EC se basan en que mediante la aplicación de una tensión, se produce en su interior una reacción química de tipo *rédox* que modifica la composición del material EC y, por tanto, su color y transmitancia. Funcionan básicamente en base a un balance entre T y A , ya que los cambios electroquímicos que se producen en su interior conllevan un cambio real en su composición química, y por ello la variación de todas sus características de absorción de radiación.

Finalmente, en el caso de los SPDs (Figura 1.2), su funcionamiento desde el punto de vista macroscópico es bastante similar al caso de los PDLCs, de forma que el balance en potencia de la radiación óptica suele realizarse fundamentalmente entre los coeficientes T y S , con menor incidencia de A y R .



Figura 1.2. Funcionamiento de una ventana SPD en estado oscuro —desactivada— y en estado claro —activada—. Cortesía de CRICURSA Cristales Curvados S.A.

Los SPD se caracterizan porque en ausencia de señal eléctrica las partículas electroforéticas están orientadas aleatoriamente y la luz incidente sufre un proceso de *scattering* dando lugar a una apariencia oscura. Cuando se aplica tensión, estas partículas se ordenan y el dispositivo conmuta a estado claro, ya que la luz ahora no es dispersada. Se trata de una tecnología patentada por Research Frontiers (USA) y licenciada a diferentes fabricantes a lo largo del mundo, la cual por su ventajosa relación área/coste frente a los EC y los PDLC está siendo incluida en un número creciente de aplicaciones industriales (Figura 1.3).



Figura 1.3. Ejemplos de aplicaciones de SPD en el sector aeronáutico (Raytheon Aircraft) y de automoción (Mercedes y Lexus).

En la tabla expuesta en la Figura 1.4 se resumen, de forma genérica, las características electroópticas y dinámicas más relevantes de los cromogénicos activos: EC, PDLC y SPD.

Los PDLC tienen como ventajas su cortísimo tiempo de conmutación —algunos milisegundos— y su capacidad de control de privacidad y, hasta ahora, su precio era más competitivo que el de los ECs, aunque menos que los SPDs. Sin embargo, son ventajas de los materiales EC sobre la generalidad de los PDLC y SPD las siguientes:

- Tienen efecto memoria y es duradero —puede llegar a días.
- Su transmitancia no depende de la dirección ni necesita polarizadores para variar. El ángulo de visión que ofrecen, por tanto, es mucho mayor.
- Requieren voltajes de conmutación muy pequeños —de 1 a 5 V.

- Tienen capacidad de control continuo y lineal de la transmitancia.
- Sobre los PDLC, presentan la ventaja de que consumen corriente únicamente durante la conmutación de estados de transmisión.

PROPIEDAD	EC	PDLC	SPD
Configuración	Recubierto entre vidrios	Laminado entre vidrios o paneles plásticos	Laminado entre vidrios o paneles plásticos
Capacidad de control óptico	Infinitos estados entre claro y oscuro	2 estados: opaco y transparente	Infinitos estados entre claro y oscuro
Velocidad de conmutación	Muy lento y dependiente del tamaño —segundos-minutos	Rápido —decenas de milisegundos, no depende del tamaño del panel	Media. 0,1-3 segundos —no depende del tamaño del panel
Forma de onda de excitación	DC	AC	AC
Potencia consumida	Muy baja	Muy Baja	Muy Baja
Control IR	Medio	Muy Bajo	Bajo

Figura 1.4. Comparativa de propiedades entre las diferentes tecnologías cromogénicas activadas eléctricamente.

Las aplicaciones de los materiales ECs se han ido incrementando considerablemente en los últimos años, en gran medida por la cantidad de I+D involucrada en el tema. El precio de un dispositivo EC está reduciéndose, y se prevé que pronto alcance los 100 \$/m² [Lee02], a diferencia de los 1000 \$/m² con que se tasaba hace pocos años. Una adecuada línea de fabricación puede ser clave para optimizar costes y algunas perspectivas optimistas en este sentido apuntan a diversas posibilidades para el futuro cercano [Ver04].

1.3 Diodos emisores de luz (LEDs)

Los diodos emisores de luz constituyen uno de los elementos fotónicos más relevantes en cuanto al amplio abanico de aplicaciones que abarcan: multimedia, telecomunicaciones, industriales, biomédicas, aeroespaciales, entre otras. Sin entrar en los detalles del funcionamiento físico del LED y de los procesos internos que ocurren para la emisión de luz, se trata de una estructura de tipo p-n la cual se polariza en directa, siendo capaz de emitir radiación óptica de acuerdo con la intensidad eléctrica que se haga pasar por la misma [Per04].

Las configuraciones más habituales que se pueden encontrar en los modelos comerciales son las siguientes:

- LED de emisión por superficie (SLED)
- LED en cúpula (*dome* LED)
- LED de emisión lateral (ELED)
- LED superluminiscente (SLD)

1.3.1 Características de funcionamiento

A continuación se describen brevemente las características más relevantes de los LEDs.

- Potencia óptica de salida. Los LED presentan en general una característica bastante lineal en lo que se refiere a la potencia óptica emitida en función de la corriente aplicada. Dependiendo del tipo de LED, esta característica se apartará más o menos de dicha linealidad. No obstante, para las propuestas investigadoras de esta tesis, se puede considerar una correspondencia lineal entre potencia emitida y corriente de polarización.
- Espectro óptico de salida. En general tendrá un espectro ($\Delta\lambda$) mucho menos monocromático que el de un diodo láser (LD). En general su ancho de línea depende de su longitud de onda de emisión. Valores habituales para $\Delta\lambda$ están en el rango de 20-40 nm —emitiendo en primera ventana— y por encima de 100 nm en segunda y tercera ventanas de comunicaciones ópticas.
- Patrón de emisión de la radiación. Habitualmente se asume que la forma del haz emitido por un LED es la de una fuente *lambertiana*, donde la potencia emitida tiene una dependencia con el ángulo de apertura del haz de la siguiente forma: $P(\theta) = P_0 \cos \theta$.
- Potencia eléctrica consumida. Se refiere al producto entre la tensión que cae entre ánodo y cátodo —habitualmente entre 1,6 V y 3,5 V, dependiendo del LED— y la corriente que se le aplica al dispositivo.

1.3.2 Mercado de los LEDs

El mercado de los LEDs a nivel mundial está en constante aumento a medida que los nuevos campos de aplicación se van asentando. Tal vez el último gran impacto de este mercado esté siendo la utilización cada vez más extendida de los LED en iluminación. Su alta eficiencia energética, menor consumo, alta duración y menor mantenimiento que otras fuentes tradicionales —lámparas incandescentes, fluorescentes, etc.— los hace especialmente indicados para aplicaciones donde prime el rendimiento energético. Además, debido a su facilidad de reciclado, se trata de una fuente luminosa más respetuosa con el medio ambiente y en línea con el ahorro energético que se impone en la actualidad.

La gráfica representada en la Figura 1.5 pretende mostrar cuál es la evolución del mercado de los dispositivos LED en los últimos años y cuál su perspectiva de crecimiento para un futuro cercano (2012). Como se puede observar, la previsión es que se multiplique casi por cinco el mercado absoluto de los LED en menos de una década (2004-2012).

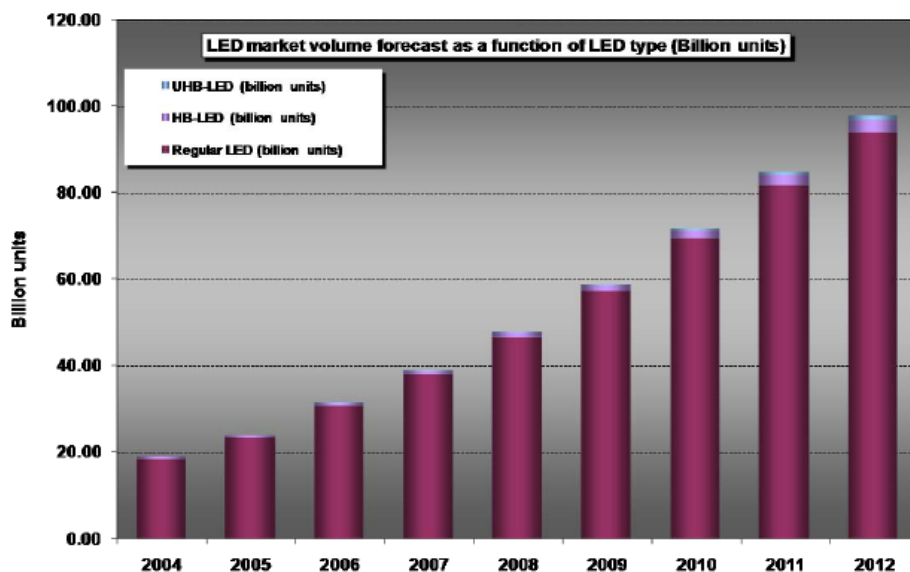


Figura 1.5. Volumen del mercado de LEDs en función del tipo de dispositivo. Fuente: Yole Développement.

En las Figuras 1.6 y 1.7 se puede observar la distribución por áreas de negocio de los LED a nivel mundial —referida al año 2008— y la previsión de mercado de los LED blancos para su uso en iluminación.

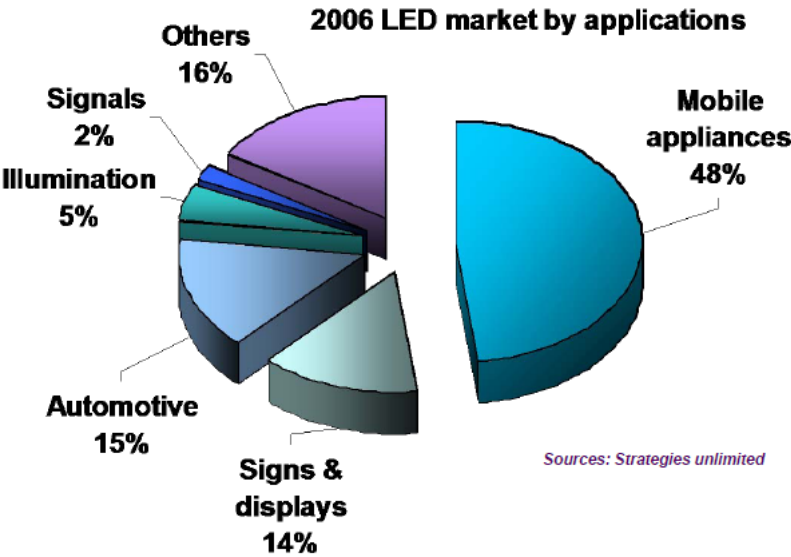


Figura 1.6. Distribución del mercado de LEDs en función del tipo aplicación.

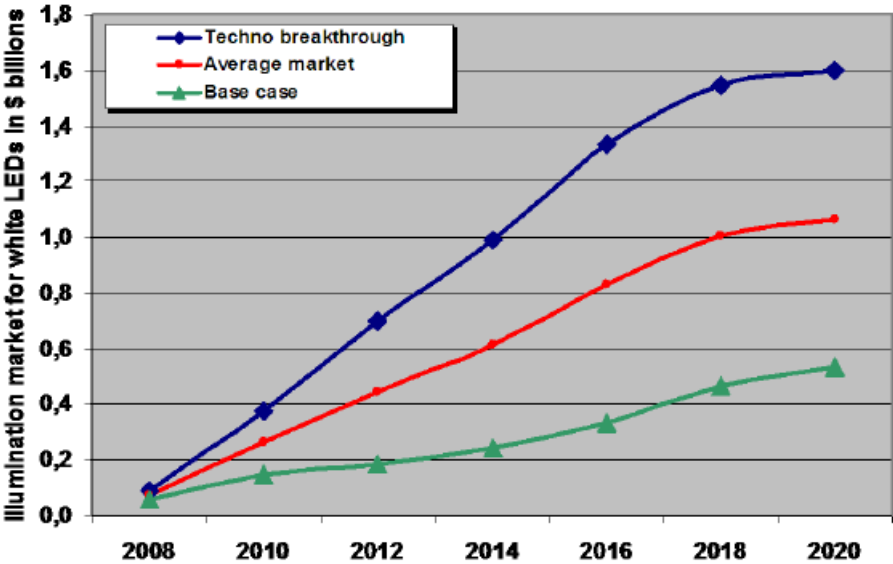


Figura 1.7. Estimación del mercado de LEDs blancos para su utilización en iluminación. Fuente: Yole Développement.

Los datos anteriores vienen a corroborar el alto impacto que la tecnología de estos dispositivos está teniendo y va a tener en los próximos años en el ámbito de la iluminación.

No obstante, existen otras muchas áreas donde los LEDs resultan de capital importancia, siendo parte esencial del sistema o solo como subsistema óptico auxiliar. Ejemplos claros de ello son los nuevos TV de gran formato y alta definición —más de 50 pulgadas— e incluso con tecnología 3D basados en LEDs, los proyectores portátiles —algunos de ellos integrados en los dispositivos multimedia habituales como teléfonos móviles, PDA, etc.—. La Figura 1.8 representa un ejemplo claro de ello.

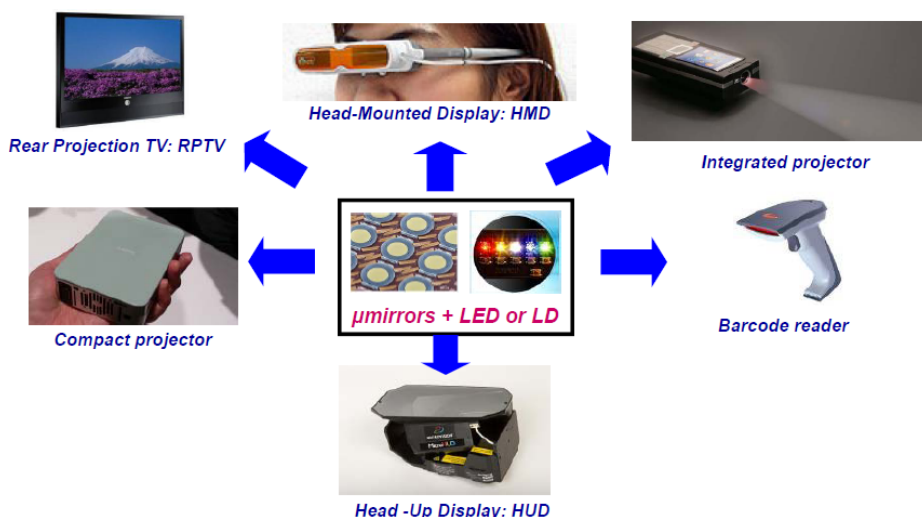


Figura 1.8. Productos que requieren el uso de LEDs.

1.4 Mercado de dispositivos de señalización de vehículos

Existen a nivel mundial varios fabricantes que copan una buena parte del mercado de los puentes de luces y que se ubican fundamentalmente en 3 países: EEUU, Brasil y China.

Uno de los fabricantes más importantes y de gran cuota de mercado en España es Federal Signal Vama [Fed09]. Entre sus productos estrella cabe destacar los siguientes:

- **Puente Vista.** Tiene una estructura en forma de “V” y una cobertura de 360°. Las luces de señalización del segundo nivel, incrementan la visibilidad del vehículo, haciendo que la conducción a velocidad a través del tráfico sea más segura. “Vista” ofrece como elección a los usuarios tanto versiones halógena como estroboscópica.
- **Series 7000/8000.** Se trata de puentes muy versátiles y pueden aceptar una muy amplia variedad de opciones que incluyen focos fijos frontales y posteriores, focos laterales, focos frontales y posteriores intermitentes, carteles iluminados, carteles de LEDs integrados, sirenas y altavoces. Es el modelo más popular en Europa (Figura 1.9). Están también disponibles tanto en versión halógena como estroboscópica. Actualmente se han rediseñado y forman parte de la serie *Phoenix*.



Figura 1.9. Puentes de luces de las series 7000/8000 de Federal Signal Vama.

- **Vector.** Compuestos por tres, cinco o nueve módulos de luz independientes y fijados en una estructura en “V”. Ofrecen gran visibilidad en los ángulos críticos de 45 a 90°, frecuentes en las intersecciones. Cada sistema, permite personalizar el puente combinando incluso luces halógenas

y estroboscópicas instaladas en los distintos módulos. Los puentes Vector pueden suministrarse con fijación magnética.

- Mini-Puentes. Son la solución más habitual para vehículos camuflados. No necesitan de preinstalación. Disponibles en versión halógena y estroboscópica, pueden estar equipados con los elementos de señalización de los puentes de mayor tamaño: altavoz, cartel iluminado, sirenas compactas, sirenas integradas, etc.

Otros fabricantes de dispositivos de señalización son:

Novaelectronics (EEUU, www.strobe.com) que compite fundamentalmente en el mercado americano y sudamericano pero con escasa implantación en Europa. Presenta un catálogo reducido de productos y accesorios, algunos de ellos incluyendo LEDs [Str10].

Asimismo, Soundoff Signal es otro fabricante americano con sucursales en varios países del mundo y que fabrica también sistemas de señalización tanto para exterior como para interior de vehículos especiales [Sou10]. Alguno de sus modelos puede ser contemplado en la Figura 1.10.



Figura 1.10. Puente de luces con LEDs de la firma Soundoff.

Por lo que respecta a fabricantes iberoamericanos, el más representativo es Rontan Eletro Metalúrgica Ltda (Brasil). Presenta un catálogo bastante importante de productos de señalización y equipos de radiocomunicaciones [Ron10]. Su mercado más importante es el propio de Brasil y también países del continente iberoamericano como México, Argentina y Uruguay, entre otros.

El mercado chino está atrayendo una gran atención a nivel mundial por el volumen en ventas que puede representar a corto-medio plazo. Existen algunos fabricantes chinos que comercializan no solo para su mercado interno sino también para otros países donde la normativa sea más laxa que en la CEE o incluso EEUU. Algunos de ellos son Ruian Huadun Security Equipment Co., LTD [Rui10], China Wenzhou AOLE Safety Equipment Co., Ltd. [Chi10] o Shenzhen UAU Electronics Co., Ltd. [She10], entre otros.

1.5 Motivación y objetivos

La motivación principal de este trabajo de tesis es contribuir al desarrollo de 2 sistemas electroópticos de rápida transferencia y aplicación industrial en 2 áreas de gran relevancia tecnológica: la domótica y la señalización vial. Desde este punto de vista se puede decir que esta tesis tiene un fuerte carácter de investigación aplicada e innovación.

El objetivo principal para el sistema domótico basado en ventanas PDLC es realizar un diseño, desarrollo e implementación novedosa que mejore a los disponibles actualmente en el mercado y que pueda ser fácilmente transferible a la empresa para una rápida instalación como un elemento más de la infraestructura domótica de un edificio inteligente. Las limitaciones actuales de este tipo de sistemas a nivel comercial son que, por un lado, sólo tienen 2 niveles de regulación —opaco y transparente— y además la forma de activarlos suele ser mediante un conmutador y

alimentados a través de un transformador a la tensión de red. El reto aquí es conseguir un mayor nivel de regulación —estabilizando niveles intermedios de transmisión— y disponer de un método flexible de activación/desactivación de los diferentes niveles ya sea a través de sensores de proximidad —activación in situ— o de forma remota a través de una aplicación web.

Por lo que respecta al segundo sistema —puente de luces para vehículos especiales— el objetivo era realizar un diseño físico, electrónico y óptico novedoso, que permitiera su patentabilidad y posterior transferencia al sector industrial para su comercialización a corto plazo. El sistema debe ser flexible, fácil de construir, barato frente a otros similares de su competencia, sencillo de operar y de bajo consumo y costes de mantenimiento.

2

Desarrollo de un sistema domótico avanzado basado en ventanas PDLC para aplicaciones en control de iluminación y privacidad

Este capítulo pretende abordar todas las fases de desarrollo de un sistema domótico basado en paneles contruidos con dispersiones de cristal líquido en matrices poliméricas (PDLCs) para su potencial aplicación en edificios y entornos inteligentes, contribuyendo a mejorar de esta forma el confort, el ahorro energético y la calidad de vida de las personas que hagan uso de este tipo de sistemas.

En julio del año 2005 comenzó un proyecto desarrollado en el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas titulado *“Optimización de Ventanas Inteligentes para Aplicaciones Domóticas y Diseño de la Electrónica de Control”* (Ref. PTR95-0940.01.OP) con una duración de 2 años y financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Durante el primero de esos 2 años se desarrolló un sistema electrónico de control para ventanas PDLC [Mar06]. Posteriormente se desarrolló un subsistema de control remoto más sofisticado a través de internet para el mismo tipo de ventanas [Gom07] el cual aumentaba de forma notable las prestaciones y posibilidades de manejo de todo el sistema global.

El objetivo de este capítulo es presentar el desarrollo de un sistema que permita controlar no una sino varias ventanas de PDLC simultáneamente permitiendo, además, el control automático tanto de forma local —mediante un sistema electroóptico— como remotamente —a través de internet—, orientando el sistema a una posible implementación en cualquier edificio inteligente.

El primer desarrollo del sistema de control se realizó con un PDLC de tipo experimental, no comercial, y su control se basó en una FPGA integrada en una placa educacional del programa de universidades de Altera, la cual había que programar cada vez que se encendía la placa. Este sistema era poco eficiente desde el punto de vista de la electrónica de control que utilizaba y también poco operativo para su aplicación a sistemas domóticos susceptibles de ser utilizados en la vida cotidiana. Se trataba, por tanto, de diseñar un nuevo concepto de sistema domótico, altamente flexible en cuanto a sus posibilidades de manejo y de interactuar con él, más eficiente en cuanto a sus prestaciones de consumo energético y más optimizado desde el punto de vista de propiedades electroópticas.

Asimismo, dentro del GDAF, se habían realizado sistemas domóticos inteligentes basados en PDLC o en SPDs que actuaban siempre sobre un único panel y la forma remota de interactuar con ellos era a través de un mando IR que enviaba unos comandos a un detector incorporado en el propio panel [Pen98, Pen99, Pen02].

En nuestro caso, el punto de partida para este desarrollo concreto, más ambicioso y de aplicación más orientada al uso industrial, fue localizar y adquirir varias ventanas de PDLC comercial y asequibles, en la medida de lo posible, y que permitieran la posibilidad de operar en paralelo o interactuar simultáneamente sobre varias de ellas conjuntamente. Este sería el primer paso para el desarrollo de este trabajo de tesis y, adicionalmente, dejara abierta la posibilidad de futuras implementaciones más complejas.

Además, se desarrolló para este sistema multipanel una PCB con los actuadores y los pulsadores que permitían el control de las ventanas ya que los pulsadores iniciales con los que se contaba dentro del Grupo de Investigación eran manuales y las tensiones para alimentar los PDLC se obtenían a partir de ± 5 V generados de una fuente de tensión, mientras que ahora se obtienen directamente de la red eléctrica mejorando su respuesta electroóptica —tanto por su amplitud como por su frecuencia.

En cuanto al sistema de control remoto, la implementación consistía no sólo en poder modificar la transparencia de cada ventana desde cualquier dispositivo con conexión a internet, sino también en crear una red inalámbrica con sensores de luz que permitiera el control inteligente del sistema global. Para la creación de dicha red se adquirió un kit comercial de la compañía Crossbow Technology sobre la que se desarrolló el hardware necesario. Además de los subsistemas hardware, el sistema requería un gran desarrollo software. Este desarrollo constaba de las siguientes fases o actuaciones:

- Programar los microprocesadores del kit.
- Crear un servidor web para alojar la aplicación que daba acceso al control de la ventana.
- Establecer una base de datos con las claves de acceso al sistema.
- Establecer unas reglas eficaces de acceso al sistema y un nivel de protección elevado frente a eventuales intrusos.

El acceso a la aplicación se controlaba mediante el típico sistema de claves almacenadas en una base de datos y el manejo de la aplicación se hacía posible gracias al establecimiento de unas políticas de acceso para evitar posibles ataques al sistema. En definitiva, el objetivo global de este

trabajo era obtener un prototipo final lo más cercano posible a un sistema comercial.

Una vez elegida la ventana de PDLC, el siguiente paso consiste en elegir el hardware necesario para poder conmutarla, los sensores que permitan interactuar con el sistema de forma local y, evidentemente, el hardware de control del sistema.

2.1 Caracterización de los componentes hardware del sistema

En este apartado se efectuará un estudio y caracterización eléctrica u óptica de los diferentes elementos hardware que integran el sistema final. Se utilizarán tanto componentes comerciales como subsistemas electrónicos y optoelectrónicos de diseño propio y específico para esta aplicación concreta.

2.1.1 Modelado y caracterización de las ventanas PDLC

La elección del proveedor de ventanas de PDLC fue sencilla —aunque larga— puesto que no había muchas alternativas y la mayoría de ellas o estaban fuera de Europa o, simplemente, no daban respuesta a las solicitudes realizadas. Al final, se pudo adquirir una muestra de la compañía multinacional francesa Saint-Gobain, tras lo cual comenzó el estudio electroóptico de dicha muestra para saber si serviría o no para alcanzar el objetivo buscado.

2.1.1.1 Modelado teórico

El principio de funcionamiento de los dispositivos contruidos efectuando dispersiones de cristal líquido —en adelante CL— en una matriz orgánica se basa en la variación que experimenta el índice de refracción efectivo de las microgotas de CL al aplicar un campo eléctrico

externo al dispositivo (Figura 2.1). Sin tensión aplicada, la diferencia de índices de refracción entre las microgotas de CL y el medio produce un fenómeno de *scattering* que hace que la luz resulte dispersada en múltiples direcciones —estado opaco—. Cuando se aplica un campo eléctrico suficientemente elevado se produce, idealmente, la adaptación de los índices de refracción del CL y la matriz, por lo que el dispositivo se comporta como un medio homogéneo permitiendo, por tanto, la transmisión de luz —estado transparente— [Rod00]. Para tensiones entre 0 V y las correspondientes al estado saturado existe una gama de transmisiones intermedias que permiten controlar parcialmente la opacidad de la ventana.

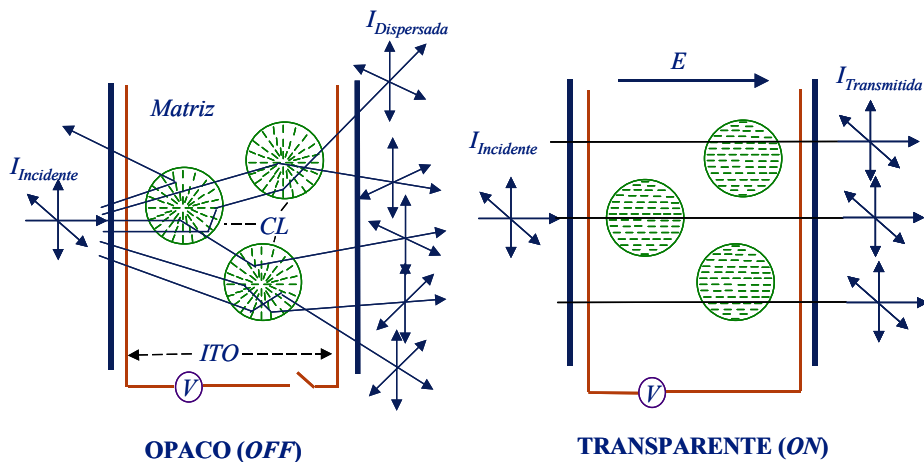


Figura 2.1. Dispositivo PDLC en estado opaco y transparente.

La herramienta para caracterizar desde el punto de vista teórico la transmisión de dispositivos PDLC es la Teoría General de Scattering [Zum86]. El cálculo de la intensidad de luz dispersada por una partícula esférica inmersa en un medio con distinto índice de refracción se define por la sección eficaz de *scattering* (C_{sca}) de dicha partícula en función de la

longitud de onda de la luz en el medio que la rodea, λ , y de los coeficientes de *scattering* a_n y b_n como:

$$C_{sca} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ |a_n|^2 + |b_n|^2 \} \quad (2.1)$$

donde

$$a_n = \frac{\psi_n(\alpha)\psi'_n(\beta) - m\psi_n(\beta)\psi'_n(\alpha)}{\zeta_n(\alpha)\psi'_n(\beta) - m\psi_n(\beta)\zeta'_n(\alpha)} \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(\alpha)\psi'_n(\beta) - \psi_n(\beta)\psi'_n(\alpha)}{m\zeta_n(\alpha)\psi'_n(\beta) - \psi_n(\beta)\zeta'_n(\alpha)} \quad (2.3)$$

siendo $\mathbf{m} = m_1/m_2$ el índice de refracción relativo de la partícula respecto al medio, $\alpha = 2\pi m_2 a / \lambda_0$, λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío y a es el radio de la partícula esférica, $\beta = 2\pi m_1 a / \lambda_0$, ψ y ζ son las funciones de Ricatti-Bessel y la prima (') denota la derivada de las funciones respecto a su argumento.

La eficiencia de scattering, Q_{sca} , se obtiene dividiendo la C_{sca} por la sección geométrica de la partícula, πa^2 :

$$Q_{sca} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ |a_n|^2 + |b_n|^2 \} \quad (2.4)$$

La variación de la eficiencia de *scattering* en función del cociente a/λ para distintos índices de refracción relativos, m , (Figura 2.2) muestra dos regiones de funcionamiento posibles:

- Región de *scattering Rayleigh*, para tamaños de partícula muy pequeños ($a \ll \lambda$). En esta zona, la luz dispersada depende inversamente de la potencia cuarta de λ . Es la responsable, por ejemplo, de que el cielo se vea azul ya que las longitudes de onda correspondientes al azul son las que tienen más energía.
- Región de *scattering Mie*, para tamaños de partícula mayores. En este caso, la dependencia de la luz dispersada con λ aparece como una oscilación decreciente alrededor de $Q_{sca} = 2$. Es la responsable, por ejemplo, de que las nubes se vean blancas, ya que la distribución de energía para las diferentes longitudes de onda es razonablemente uniforme.

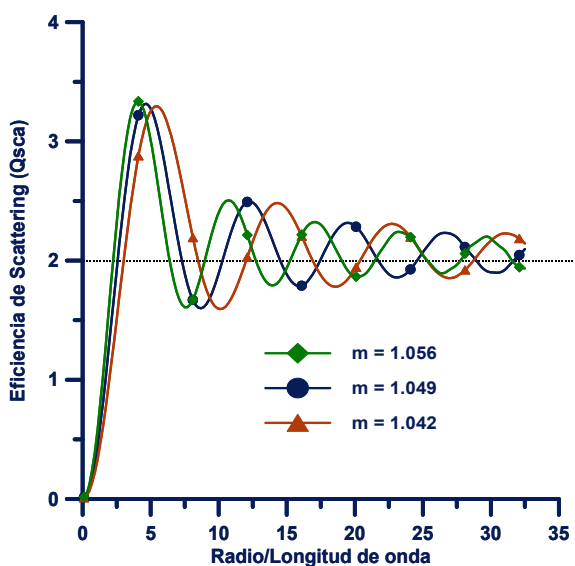


Figura 2.2. Eficiencia de *scattering* frente a a/λ para tres índices de refracción relativos, m , distintos.

La potencia dispersada, P_{sca} , por una única partícula es proporcional a la intensidad luminosa incidente, I_o , siendo la sección eficaz de *scattering* la constante de proporcionalidad.

$$P_{sca} = C_{sca} I_o \quad (2.5)$$

Esta potencia dispersada puede obtenerse por integración de la intensidad dispersada, I_{sca} , sobre la superficie de una esfera que rodea a la partícula como:

$$P_{sca} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_{sca} r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.6)$$

donde r es la distancia entre la partícula y la esfera de integración.

Este resultado se puede generalizar para un medio en el que se encuentran inmersas un número N de partículas. Si el número de partículas en relación al volumen total del medio es suficientemente bajo se puede despreciar el efecto de *scattering* múltiple entre partículas. Además, si las partículas se hallan distribuidas aleatoriamente en el medio, las fases de las ondas dispersadas serán también aleatorias, con lo que las intensidades de *scattering* de las partículas pueden sumarse directamente.

En estas condiciones, la intensidad transmitida (I_t), en relación a la intensidad incidente (I_o), a través de un medio de espesor d en el que existe un número N de partículas de igual tamaño puede obtenerse como:

$$T = \frac{I_t}{I_o} = \exp(-NC_{sca}d) \quad (2.7)$$

Esta es la expresión de mayor interés para la propuesta concreta que aquí se plantea, ya que relaciona la intensidad de la transmisión incidente con la transmitida en función de parámetros tecnológicos del dispositivo PDLC.

2.1.1.2 Caracterización experimental

La ventana o panel de muestra del tipo SGG PRIVA-LITE® fue suministrada con una fuente de alimentación que permite hacer transparente la ventana proporcionando una tensión casi sinusoidal, en carga, de unos 137 V eficaces y casi 130 Hz de frecuencia, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.3.

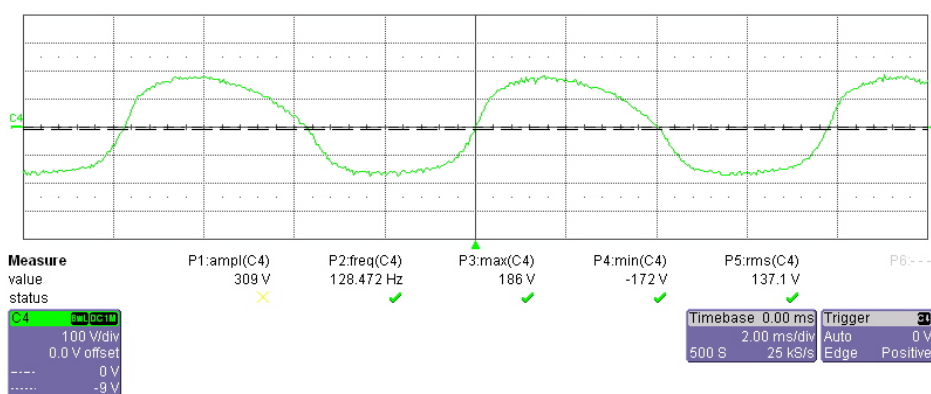


Figura 2.3. Señal de excitación aplicada a la muestra PDLC original obtenida con un osciloscopio digital Lecroy.

La amplitud obtenida supera los 110 V que se indican en la fuente de alimentación y supone una limitación a las pruebas que se realizarían a continuación. Para poder simplificar el *driver*, lo ideal sería poder alimentar la ventana de forma casi directa a través de ésta por lo que las pruebas se realizaron a la frecuencia de red —50 Hz— obteniéndose resultados positivos que se resumen en que la ventana aumentaba su transparencia cuanto más tensión eficaz se le aplicaba y no se observaban parpadeos ni

ningún otro tipo de efectos ópticos espurios para excitar la ventana a distintas tensiones y a frecuencia de red.

Así pues, se procedió a caracterizar la curva electroóptica de la ventana para distintos valores de tensión aplicados utilizando una lámpara modelo TS-425 de Acton Research Corporation —ahora Princeton Instruments— y un espectrógrafo modelo SpectraPro® 300i de la misma compañía. Las medidas se realizaron entre 0 V y 70 V eficaces generando la señal de excitación desde un generador HP 33120A. Esta señal era posteriormente amplificada por un amplificador F10A de la empresa FLC Electronics no pudiendo de esta forma alcanzar una tensión eficaz sinusoidal mayor apta para su aplicación a la ventana PDLC. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.4.

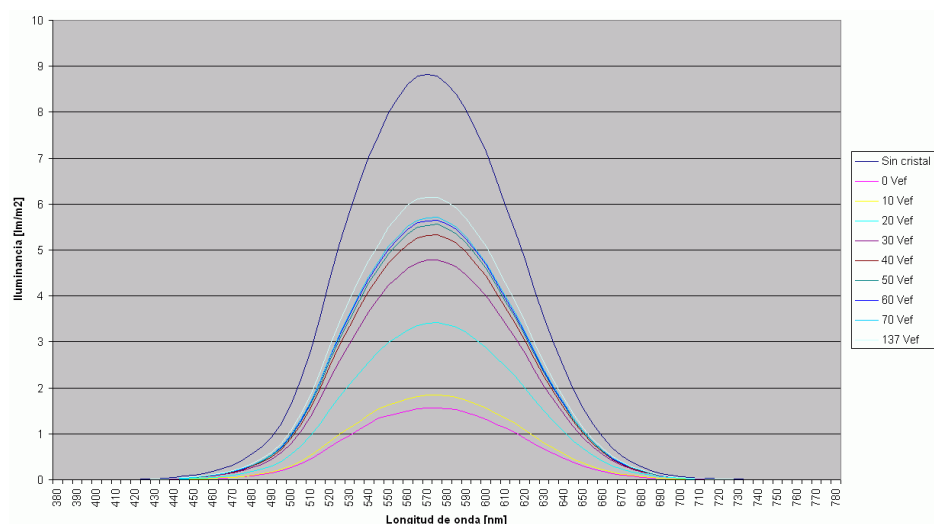


Figura 2.4. Iluminancia medida tras la muestra de PDLC para distintas tensiones de excitación. La iluminancia total para cada tensión es el área de su respectiva curva.

Se ha comprobado experimentalmente que se produce una pequeña histéresis en las medidas y, por tanto, las curvas varían ligeramente cuando se realizan las medidas entre 70 V y 0 V eficaces. Este efecto ha sido

descrito en la literatura por varios autores [Rod00, Zum86, Mon88]. No obstante, la diferencia en las magnitudes ópticas es escasa y no tiene mucha relevancia de índole práctica a la hora de estimar los valores de tensión que serían necesarios para excitar las ventanas PDLC de forma óptima, en el sentido de hacer lo más lineales posibles los niveles de transparencia de las mismas [Wu87]. La no linealidad de estos resultados se puede ver reflejada perfectamente en la Figura 2.4 y en la Figura 2.5. Tampoco el sistema muestra una variación de forma logarítmica tal y como se podría pensar inicialmente [Per99].

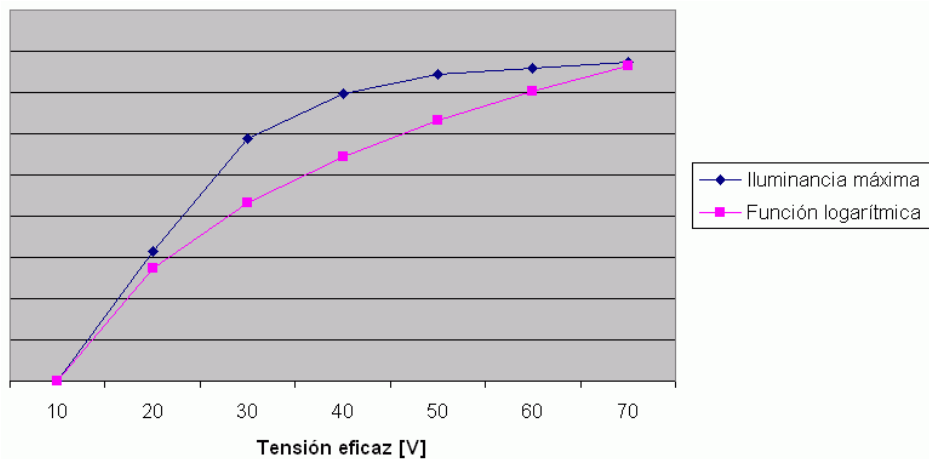


Figura 2.5. Desviación de la respuesta logarítmica presentada por la muestra de PDLC caracterizada.

La siguiente decisión a tomar era más complicada puesto que de ella dependería directamente el hardware del sistema: el número de niveles de transparencia que se pudieran establecer en cada ventana.

Esta decisión se tomó en gran parte en base a la elección del nuevo sistema de control. Partiendo del primer sistema, lo lógico habría sido seguir trabajando con una FPGA pero dado que ésta debía comunicarse con la tarjeta de adquisición de datos del kit para hacer la red inalámbrica

de sensores y dicha tarjeta lleva conectado un microprocesador relativamente potente, se planteó la idea de utilizar dicho microprocesador para realizar todas las tareas, idea que finalmente fue la adoptada.

Lo primero era conocer con exactitud los recursos que la tarjeta de adquisición de datos ofrece y que se pueden ver resumidos a continuación:

- 8 canales analógicos, con conversión a digital de 16 bits y rango de entrada entre 0 y 2,5 V.
- 8 canales digitales de entrada/salida.
- 3 canales para excitar sensores externos a 2,5 V, 3,3 V ó 5 V, independientemente de la alimentación que se le dé a la tarjeta.
- 2 salidas para encender directamente LEDs (informativos).

De los 8 canales digitales se podrían utilizar 2 como entradas para permitir el control manual del sistema y las 6 restantes como salidas para actuar sobre las ventanas. Así pues, se podrían controlar, de forma directa, 2 ventanas con 8 niveles de transparencia cada una o 3 ventanas con 4 niveles de transparencia como en el sistema del cual se partía.

Otra opción habría sido el control indirecto de cada ventana por multiplexación. De ese modo, se podrían haber controlado 4 ventanas con 16 niveles de transparencia —2 canales para las ventanas y 4 para controlar la transparencia, por ejemplo—. Sin embargo, las pruebas que se realizaron para ver si esto era posible fueron negativas ya que, incluso en el mejor de los casos, se observaba parpadeo de las ventanas a simple vista puesto que la idea de trabajar directamente a frecuencia de red ya era más una especificación que una idea en sí. En las Figuras 2.6 y 2.7 se muestran las medidas de intensidad luminosa realizadas cuando una ventana se alimenta

durante 60 ms y 80 ms, respectivamente, dejando el resto del tiempo hasta completar 100 ms en alta impedancia. Dichas medidas se consiguieron alimentando la ventana a través de un relé G6A-424P de Omron y controlándolo con una señal de tipo *burst* generada con un HP33120A tal y como se indica en el capítulo 2 de su guía de usuario [Agi02].

En la Figura 2.6 se ve claramente que la intensidad cae demasiado si se deja 40 ms sin excitar la ventana y en la Figura 2.7 se observa que ocurre justo lo contrario, que la intensidad no cae en absoluto al cortar la excitación durante tan sólo 20 ms. Ambos hechos provocan un molesto parpadeo en la ventana PDLC lo que obliga a descartar este método de control. Se pensó en dos soluciones a este problema. La primera de ellas evitar el cruce por cero de la señal de excitación, lo cual supondría un tratamiento excesivo para un microcontrolador no dedicado —además de tener que descartar la alimentación de red—, y la segunda en poner una resistencia en el último caso para que el PDLC se relajase más rápidamente, cosa que se probó con un potenciómetro de 2 M Ω multivuelta pero que no dio tampoco un resultado positivo.

Por otro lado, también se pensó en controlar el nivel de transparencia por PWM. Sin embargo, esto supondría tener que amplificar las señales después de su procesado por lo que se complicaría el hardware y ya no tendría sentido pensar en excitar “directamente” las ventanas a través de la red. Además se consideró que los 4 niveles utilizados en el sistema inicial podrían valer por lo que esta opción también se descartó.

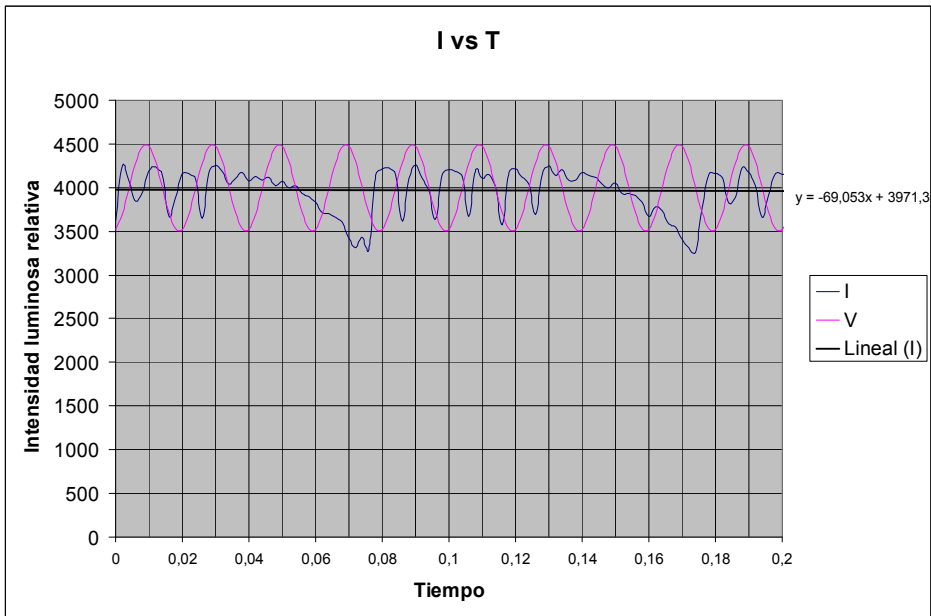


Figura 2.6. Curva de la intensidad luminosa a 600 nm que atraviesa la ventana cuando ésta se excita durante 3 ciclos de red y se deja los 2 siguientes en alta impedancia.

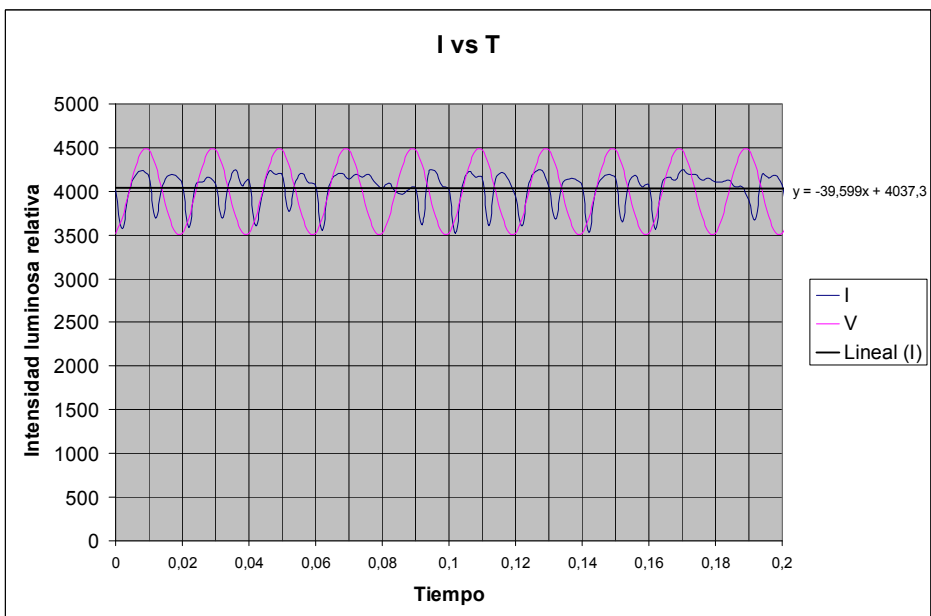


Figura 2.7. Curva de la intensidad luminosa a 600 nm que atraviesa la ventana cuando ésta se alimenta durante 4 ciclos de red y se deja el siguiente en alta impedancia.

2.1.2 Sistema de excitación de ventanas PDLC

Una de las decisiones importantes a tomar era decidir si sería más interesante disponer de un control más fino para menos ventanas o disponer de tan sólo 4 niveles de transparencia con la posibilidad de controlar más ventanas. Dado que controlar solamente 2 ventanas parecía insuficiente, la idea de dejar 4 niveles de transparencia fue asentándose. Además, la forma más lógica de obtener la excitación para cada nivel sería a través de un transformador reductor y está claro que resultaría mucho menos costoso el hecho de tener que obtener 3 tensiones distintas que 7, dado que un nivel se establece sin alimentación.

Por tanto, la decisión de establecer 4 niveles de transparencia parecía la más apropiada para el tipo de sistema domótico que se pretendía implementar y, en base a la Figura 2.4, se decidió que las tensiones necesarias deberían ser de alrededor de 20 V, 30 V y 110 V eficaces, siendo esta última fácil de obtener a partir de un transformador con una relación de transformación 220:2 y próxima a los 137 V eficaces que suministraba la fuente que se vendía conjuntamente con las muestras de PDLC comerciales —a mayor tensión, menor diferencia en la transparencia— y correspondiéndose las otras dos a 3 y 4,5 lm/m² respectivamente, que son los valores intermedios entre los 1,5 lm/m² que deja pasar la ventana a 0 V y los 6 lm/m² que deja pasar a 137 V eficaces, valores que, por otro lado, también se pueden obtener fácilmente a través de un transformador mediante las relaciones de transformación 220:11 y 220:7, dando esta última un valor no exacto pero próximo a los 30 V buscados.

2.1.3 Sensores

La siguiente decisión a tomar era decidir el tipo de sensores que se utilizarían para actuar sobre las ventanas de forma local. La idea en un principio era utilizar 2 sensores de presencia que dieran una salida digital,

de modo que permitieran interactuar con el sistema como si se tratase de los 2 botones de un ratón pero a distancia —de ahí que se reservaran 2 canales digitales como entradas—. Esto sería suficiente y consumiría pocos recursos. No obstante, en la búsqueda del sensor más adecuado se encontró una solución mejor.

El sensor que primero se tomó en cuenta fue el GP2D15 de Sharp, que permite detectar presencia a una distancia ajustable entre 10 cm y 80 cm con una precisión de ± 3 cm, valores más que razonables para esta aplicación concreta. Sin embargo, existe una versión con salida analógica de dicho sensor que permite conocer la distancia a la cual se encuentra el objeto detectado, el GP2D12. Estos sensores permitirían un mayor control del sistema y se podían conectar perfectamente a la tarjeta de adquisición de datos puesto que ésta dispone de 8 entradas analógicas, liberándose además los 2 canales digitales reservados para las entradas, permitiendo de este modo el control de una ventana más y permitiendo a su vez la incorporación de más sensores hasta un máximo de 8.

Así pues, se tomó la decisión de incorporar este tipo de sensores al diseño, a pesar de la carga que pudieran suponer al microprocesador puesto que éste ya formaba parte del mismo, y se permitió el control de 4 ventanas con 4 niveles de transparencia, ya que la siguiente opción, que sería controlar 3 ventanas con 8 niveles de transparencia, no es posible utilizando solo 8 canales —sería necesario uno más.

Y por último, se decidió incorporar al diseño 3 sensores más, haciendo un total de 5, para poder controlar en caso necesario cada ventana con uno de ellos y tener uno adicional para permitir el control maestro de todas las ventanas. Introducir más sensores sólo serviría para aumentar el precio del sistema y su consumo, el cual siempre es importante aunque el sistema no sea móvil y que además se podría ver reducido en gran medida

si se aprovecharan los canales de excitación que ofrece la propia tarjeta de adquisición de datos.

Una vez tomada esta decisión se adquirieron varios de estos sensores y se pudo comprobar que para su correcto funcionamiento se deben alimentar dentro de los valores recomendados —entre 4,5 y 5,5 V— y que dan una salida máxima de unos 3 V.

A pesar de que los componentes principales del sistema ya estaban elegidos, todavía faltaba la elección de 2 componentes fundamentales: el o los transformadores que proporcionaran las tensiones de alimentación y los relés que permitieran el accionamiento del sistema.

2.1.4 Transformador y relés

La elección del transformador fue relativamente sencilla. Dado que no existe ningún transformador comercial que permita obtener las 3 tensiones necesarias, se pensó en utilizar uno que redujera la tensión de red a los 110 V eficaces —tensión habitual en muchos países— para luego obtener las demás tensiones con simples divisores de tensión. No obstante, esta opción no era tan buena puesto que dichos transformadores son difíciles de encontrar y los divisores de tensión se deberían evitar, en la medida de lo posible, debido a su escasa eficiencia para este tipo de aplicaciones concretas. Así pues, se optó por la única alternativa que quedaba, que era mandar construir un transformador a medida que generara estas tres salidas. Afortunadamente, se pudo contactar con una empresa cercana a la universidad (TESAL) que lo fabricó en un periodo de tiempo muy breve y con un precio muy ajustado en base, tan sólo, a las tensiones que se deseaba obtener, en donde iría montado y a las corrientes límite que debería proporcionar, que se estimaron en función de las tensiones máximas de pico de cada componente utilizado, por lo que el transformador quedó ligeramente sobredimensionado y, a pesar de no

tener un tamaño excesivo, pasó de ir montado sobre la placa que se diseñó a ser el propio soporte de la placa. Las salidas se midieron, una vez fabricado, dando unos valores de 21,4 V, 29,4 V y 117,7 V eficaces.

Por otro lado, había que elegir unos relés que hicieran el menor ruido posible para evitar molestias acústicas y que fueran lo más pequeños posible, dado el escaso espacio disponible, puesto que habría que integrar 16 en la placa —uno para cada uno de los 4 niveles posibles para cada una de las 4 ventanas— contando también con el establecimiento del nivel 0 V ya que, si no se fuerza este nivel, la ventana se oscurecería de forma paulatina, lo cual sería un efecto no deseado ya que los demás niveles de transparencia sí que se establecerían inmediatamente.

La idea era conseguir unos relés de estado sólido, que son unos circuitos híbridos, normalmente compuestos por un optoacoplador que aísla la entrada, un circuito de disparo, que detecta el paso por cero de la corriente de línea y un triac o dispositivo similar que actúa de interruptor de potencia [Moh03]. Dichos relés tienen un comportamiento similar al de un relé electromecánico pero admiten un ciclo de vida mayor, no hacen ruido puesto que no tienen contactos y se pueden integrar mejor.

Así pues, se procedió a buscar un relé de este tipo que sirviera para este sistema y en dicha búsqueda se encontró la solución ideal para nuestro caso, el relé MOSFET. Se trata de un relé que, si bien se puede considerar de estado sólido, en la propia página web del fabricante Omron [Omr09] los catalogan en distinta categoría. Y es que con esta tecnología llegan a integrar relés en encapsulados de tamaño diminuto —1,7 x 4,2 x 1,8 mm.

No obstante, todavía quedaba por encontrar el relé MOSFET que permitiera controlar las ventanas aplicándoles tensiones de hasta 110 V eficaces. Según las especificaciones de las ventanas adquiridas suministradas

por el fabricante, ya se sabía que el máximo consumo eléctrico de éstas es de 5 W/m^2 y, dado que las muestras son de $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ aproximadamente, esto supondría un consumo máximo por muestra de $0,3 \text{ W}$, lo que supondría unas corrientes de menos de $2,73 \text{ mA}$. A pesar de todo, se realizaron medidas experimentales obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 2.8.

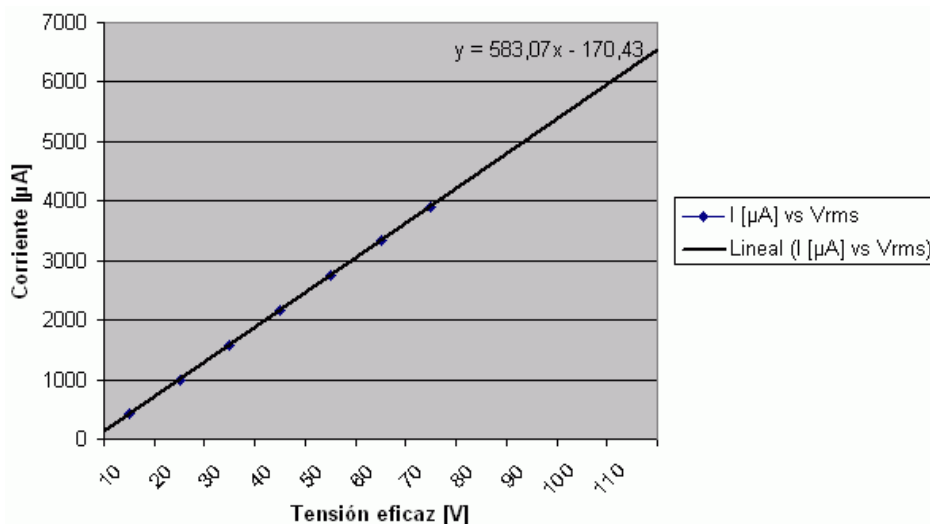


Figura 2.8. Intensidad de corriente que atraviesa una muestra de PDLC en función de la tensión eficaz que se le aplica.

Dado que la cantidad de corriente que consumen estos dispositivos es claramente lineal, respecto a la tensión que se les aplica, se pudo extrapolar hasta los 110 V eficaces a partir de medidas a tensiones inferiores, observándose que a esta tensión la intensidad requerida es algo más del doble del máximo teórico siendo aun así una cantidad pequeña, que no llega a los 110 mA/m^2 .

Con estos datos, y en base a los relés potencialmente más aptos para esta aplicación, se optó por el G3VM-351G de Omron, capaz de soportar tensiones de hasta 350 VAC e intensidades eléctricas de hasta

110 mA trabajando de forma continua, viniendo en un encapsulado de montaje superficial de 3,9 mm x 4,4 mm x 2,1 mm con 4 pines.

2.2 *Diseño hardware del sistema*

A continuación se describen de forma detallada los diferentes pasos llevados a cabo para la realización del diseño hardware del sistema global. Para realizar el diseño de la placa donde iría montado el nuevo hardware se optó por una herramienta disponible, conocida y que permitiría perfectamente realizar el diseño de la nueva placa: el programa Layout Plus del paquete de software OrCAD 10.

2.2.1 Sistemas de alimentación

El encendido de la placa se decidió hacer con un interruptor de palanca relativamente grande y que, además, incluye un LED que se enciende solo cuando se activa el sistema.

Dicho interruptor iría conectado a la red y a la entrada del transformador y las salidas de éste irían directamente conectadas a los relés correspondientes. Los terminales negativos de cada salida tendrían que cortocircuitarse puesto que venían en bobinas independientes y a su vez deberían conectarse a un fusible, debidamente dimensionado, el cual acabaría en lo que sería la tensión de referencia para alimentar las ventanas. Además, la salida de menor tensión del transformador serviría para obtener las tensiones continuas necesarias en el circuito. Lo ideal habría sido dotar al transformador de una o dos salidas más para tal efecto pero esto no se hizo puesto que con solo 3 salidas el sistema ya sería funcional y se desconocía el grado de complejidad extra que esto podría llegar a suponer a la hora de fabricarlo, aparte de posible aumento de tamaño del mismo.

Las tensiones continuas necesarias eran dos: 3 V para alimentar la tarjeta de adquisición de datos y el microprocesador y 5 V para alimentar

los sensores, puesto que ya se comprobó que a 3 V daban medidas con mucho ruido y muy poco fiables. La idea de alimentar la tarjeta de adquisición de datos a 5 V también se tuvo que descartar puesto que, a pesar de que en las especificaciones se indica que se puede alimentar a dicha tensión, no hay que olvidar que va conectada a la placa que lleva el microprocesador y ésta no puede alimentarse a más de 3,3 V.

Tras rectificar la señal del transformador de más de 28 V de pico con un puente de diodos adecuado, se filtró la señal con un condensador lo suficientemente grande, cuyo valor se estableció en 47 μF tras realizar las medidas oportunas en el laboratorio, y a partir de la señal filtrada se obtuvieron las tensiones buscadas: los 5 V directamente a partir de un regulador lineal típico, el 7805, y los 3 V a partir de un regulador ajustable, ya que no se disponía de ningún regulador que diera directamente 3 o 3,3 V y no iba a ser fácil conseguirlo. El regulador utilizado fue el LM317T y su ajuste se realizó experimentalmente con varias resistencias —partiendo de la base de que tendría que ser menor de 360 Ω según lo deducido de la fórmula que aparece en las hojas de características— puesto que la tolerancia intrínseca de estas podría provocar unas muy distintas tensiones de salida y era fundamental que no se sobrepasaran los 3,3 V para no dañar el valioso hardware de control.

Se decidió realizar la alimentación de los sensores de proximidad a través de un interruptor hecho con un transistor MOSFET y controlado directamente con la salida del canal de la tarjeta de adquisición de datos que está habilitado para excitar sensores externos a 5 V. De este modo se conseguiría reducir en gran medida el consumo del sistema, a pesar de tener que alimentar todos los sensores cada vez que se quisiera muestrear uno. Sin embargo, no se tuvo en cuenta que dicha señal de excitación se obtiene a partir de una alimentación de 3 V y de ahí surgió un problema

porque la señal de 5 V llevaba superpuesta una pequeña señal sinusoidal de alta frecuencia —relativamente— y esto provocaba que la salida de los sensores se viese alterada y, por tanto, no se podían obtener medidas fiables dentro de un rango aceptable. La solución a este problema de diseño se tuvo que tomar a posteriori y fue tan simple como filtrar la señal de excitación con un condensador de 470 nF y filtrar a su vez la salida de cada sensor con un condensador de 100 nF. No obstante, al final lo que se hizo no fue filtrar la salida de cada sensor sino la entrada a los correspondientes canales analógicos de la tarjeta de adquisición de datos, puesto que la señal había que adaptarla y así se obtuvieron mejores resultados, ya que la adaptación consistía en dividir por dos la salida de los sensores, puesto que los canales analógicos de la tarjeta sólo admiten tensiones máximas de 2,5 V y la alimentación de los sensores es de 5 V, aunque la salida máxima medida experimentalmente no llegara a los 3 V. Hay que decir que dicha adaptación de niveles es posible realizarla directamente en la tarjeta pero que se decidió no hacerla por tratarse de un trabajo experimental y no de un diseño final.

2.2.2 Indicadores de estado del sistema

Se decidió que las indicaciones del estado del sistema correrían por parte de los dos LEDs que se pueden alimentar directamente desde la tarjeta de adquisición de datos, que no son sino unas salidas que reflejan el estado de los 3 LEDs que posee con ese mismo fin. Para simplificar el hardware se eligieron unos LEDs que se pudieran conectar directamente a los canales correspondientes. Dado que la máxima corriente de salida de los pines del microcontrolador utilizado es de 40 mA —se trata de un ATmega128L— y que la tensión de alimentación de la placa es de 3 V, se concluyó que servirían los HyperLED 3 mm —de OSRAM— de color azul y blanco, puesto que se disponía de varios que se activan con una tensión directa de 3,1 V.

Por último quedaba establecer la conexión de los relés. Eran necesarios 4 demultiplexores y estos se obtuvieron a partir de 2 chips duales del tipo 74HC139N, rápidos y disponibles. Dado que sus salidas están negadas y que tan sólo un relé se iba a activar en cada momento, dichas salidas podrían conectarse directamente al cátodo del LED que permite activar cada relé —pin 2 de la Figura 2.9—, mientras que los ánodos podrían cortocircuitarse y alimentarse a 3 V a través de una única resistencia cuyo valor se estableció en $240\ \Omega$ puesto que la caída de tensión típica en polarización directa del LED es de 1,15 V y la corriente de operación típica en esta situación es de 7,5 mA por lo que, teóricamente, la resistencia debería tener el valor calculado en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3 - 1,15}{7,5 \cdot 10^{-3}} = 246,6\ \Omega \quad (2.8)$$

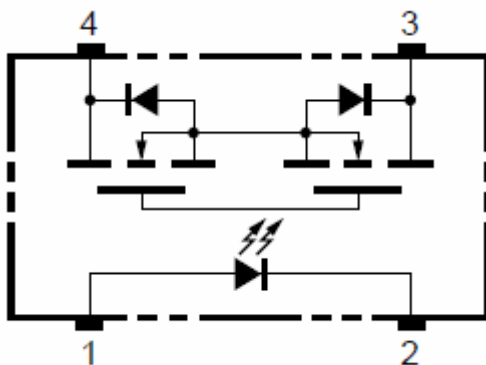


Figura 2.9. Disposición de terminales y conexiones internas del relé G3VM-351G.

2.2.3 Excitación de las ventanas PDLC

En cuanto a las tensiones de excitación de las ventanas, se decidió que irían al pin 4 de cada relé (Figura 2.9) y los pines número 3 de cada uno

de ellos se cortocircuitarían y se conectarían directamente a la ventana correspondiente. Se contempló la posibilidad de que se pudieran cortocircuitar las salidas del transformador si un relé se activase antes de la desactivación de otro pero se supuso, con buen criterio, que esto no debería ocurrir. La razón de ello estriba en que el tiempo típico de activación de un relé es el triple que el de desactivación, siendo de 0,3 ms el primero y de solamente 0,1 ms el segundo, habiéndose establecido para ambos un máximo de 1 ms por lo que siempre deberían desactivarse antes de producirse un cortocircuito, siempre y cuando la señal les llegase simultáneamente, tal y como es el caso, ya que los tiempos de propagación en los demultiplexores son de, tan sólo, 11 ns.

Así pues, el esquema del diseño final del circuito quedó especificado tal y como se puede apreciar en la Figura 2.10.

2.2.4 Diseño de la PCB

La última fase era realizar el diseño de la placa de circuito impreso (PCB) que albergara los componentes descritos previamente.

Lo primero que se tuvo que hacer es crear una huella —conjunto formado por las isletas de cobre donde se sueldan los terminales de los componentes y la línea que los delimita físicamente— para poder soldar el transformador a la placa, dado que era imposible encontrar una huella ya creada para un transformador que se fabricó específicamente para este proyecto. Se estableció que, por las dimensiones y el peso del transformador, lo más operativo sería no montar el transformador sobre la placa, sino montar la placa sobre el transformador, quedando ésta en posición vertical, permitiendo conectar fácilmente el interruptor y los LEDs y evitando así tener que ponerle separadores o cualquier elemento de sujeción. Además, de este modo se podría poner la tarjeta de adquisición de

datos sobre el propio transformador, separándola de éste con una base de plástico que venía con el kit.

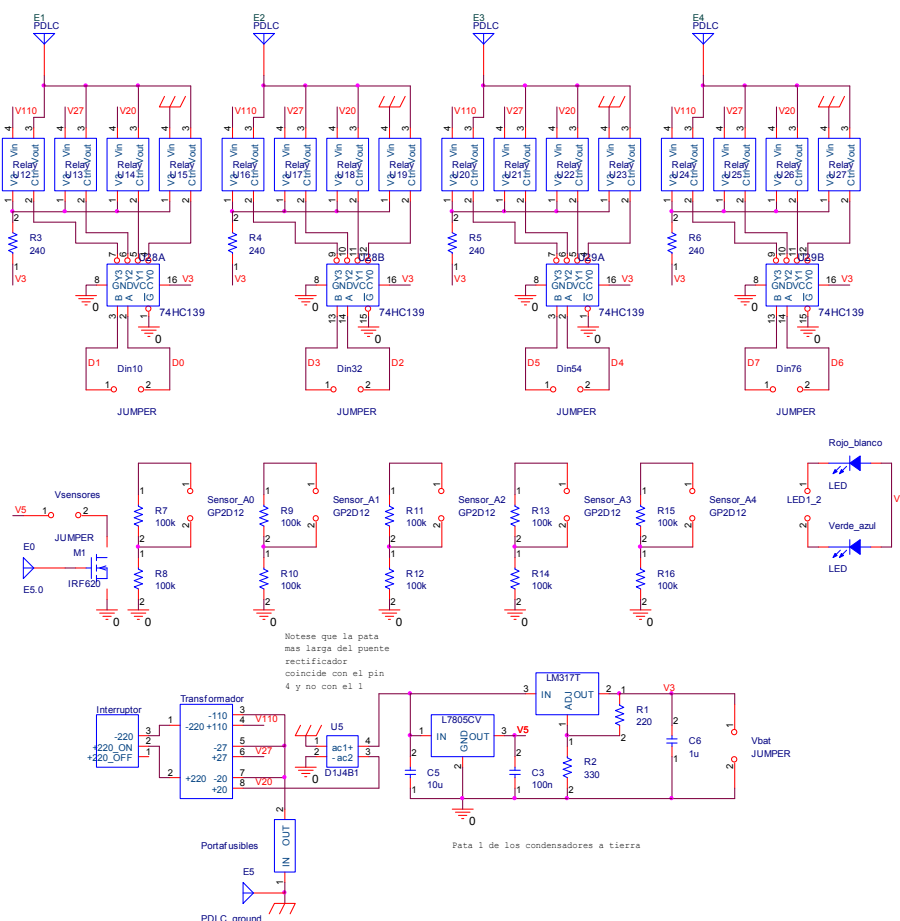


Figura 2.10. Esquema electrónico propuesto para el circuito de control de las ventanas de PDLC.

Las huellas del interruptor, de los LEDs y de los relés también se tuvieron que crear específicamente, en base a los datos aportados por sus hojas de características, y el dibujo de los reguladores se tuvo que modificar porque no coincidía con los dispositivos que finalmente se utilizaron.

La huella del puente de diodos se tomó de forma genérica lo que provocó problemas en el montaje puesto que no coincidía exactamente y la

huella del portafusibles se realizó a partir de una huella genérica, una vez se supo el tamaño del fusible que se iba a poner, lo cual también supuso algún problema a la hora de montarlo en la placa, lo cual llevó a la conclusión de que más vale perder el tiempo en crear todas las huellas necesarias para el proyecto que partir de huellas ya hechas. No obstante, la creación de huellas de elementos, de los cuales no se tiene unas características dadas, no resulta nada obvio, al menos en primera instancia.

Por último decir que el tamaño del fusible dependía, como es lógico, de la corriente que permitiera pasar y ésta se estimó en función de los valores máximos de intensidad que pudieran necesitar los componentes principales del sistema, que se pueden ver a continuación:

- sensor de proximidad: 50 mA
- ventana PDLC: 7 mA
- tarjeta de adquisición de datos: 5 mA
- microprocesador: 8 mA
- radio: 19,7 + 17 mA —recepción + transmisión
- memoria flash serie: 15 + 4 mA —escritura + lectura.

Por lo que la máxima intensidad que se podría requerir del transformador sería de:

$$I_{\max} = 5 \cdot \hat{I}_s + 4 \cdot \hat{I}_{PDLCs} + \bar{I}_{MDA320} + \bar{I}_{\mu P} + \bar{I}_{RF} + \bar{I}_{FLASH} \approx 350 \text{ mA} \quad (2.9)$$

Así que se optó por un fusible de 500 mA. No obstante, habría sido más que suficiente considerar tan sólo 27 mA para los sensores —media entre los 20 y 34 mA que se observó era lo que consumían realmente—,

6mA para las ventanas por trabajar a 110 V y no a 137 V eficaces y desestimar el uso de la memoria flash y de la transmisión de radio, quedando de esa manera un consumo en corriente de:

$$I_{cons} = 5 \cdot \bar{I}_s + 4 \cdot \hat{I}_{PDLCs} + \bar{I}_{MDA320} + \bar{I}_{\mu P} + \bar{I}_{RFin} \approx 192 \text{ mA} \quad (2.10)$$

Una vez creadas todas las huellas de los componentes ya sólo quedaba dar un tamaño a la placa y colocarlos sobre ella de la manera más eficiente posible desde el punto de vista ergonómico y electrónico, aprovechando las 2 únicas capas sobre las que se podía dibujar pistas como consecuencia del método de fabricación utilizado, dibujo que se creó de forma automática debido a la imposibilidad de hacer un diseño óptimo contando con tan sólo 2 capas y teniendo que conectar los 16 relés de montaje superficial —situados en una misma capa— agrupados de 4 en 4 y con múltiples conexiones tanto entre los relés de cada grupo como entre los de los distintos grupos.

La placa se sobredimensionó ligeramente respecto al tamaño del transformador para no apurar el espacio y que esto supusiera problemas de diseño de pistas y de montaje, quedando con un tamaño final de unos 10,2 cm de ancho por 6,6 cm de alto.

El voluminoso interruptor se colocó en la parte central inferior junto a los terminales de entrada del transformador que, como se puede suponer, daría soporte a la placa desde su parte trasera.

Los conectores se dispusieron alrededor de ésta para que estuvieran accesibles desde el exterior, al igual que el fusible, dejando en la parte superior la conexión al puerto digital de la tarjeta de adquisición de datos por proximidad, la salida a las ventanas a la derecha y las entradas y salidas de los sensores de proximidad a la izquierda junto a las resistencias que

adaptan sus salidas a las entradas y sobre las entradas a los LEDs que se colocaron lo más cerca posible, en la parte inferior izquierda de la placa.

Por último, se decidió colocar los relés en la capa trasera de la placa, aprovechando su escasa altura, dispuestos a ambos lados de la placa y alrededor de los demultiplexores que se encargarían de activarlos, dejando el resto de la placa para los sistemas de alimentación de corriente continua.

El resultado final de esta disposición se puede apreciar en la Figura 2.11 donde se pueden observar, a escala natural, las huellas de cada uno de los componentes en su emplazamiento definitivo en la PCB diseñada.

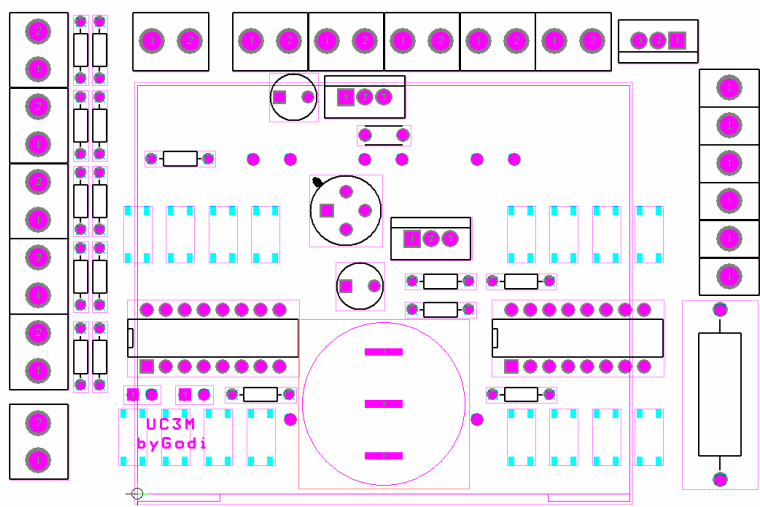


Figura 2.11. Emplazamiento de los componentes en la PCB diseñada.

En la Figura 2.12 se muestra una fotografía del montaje final del sistema.

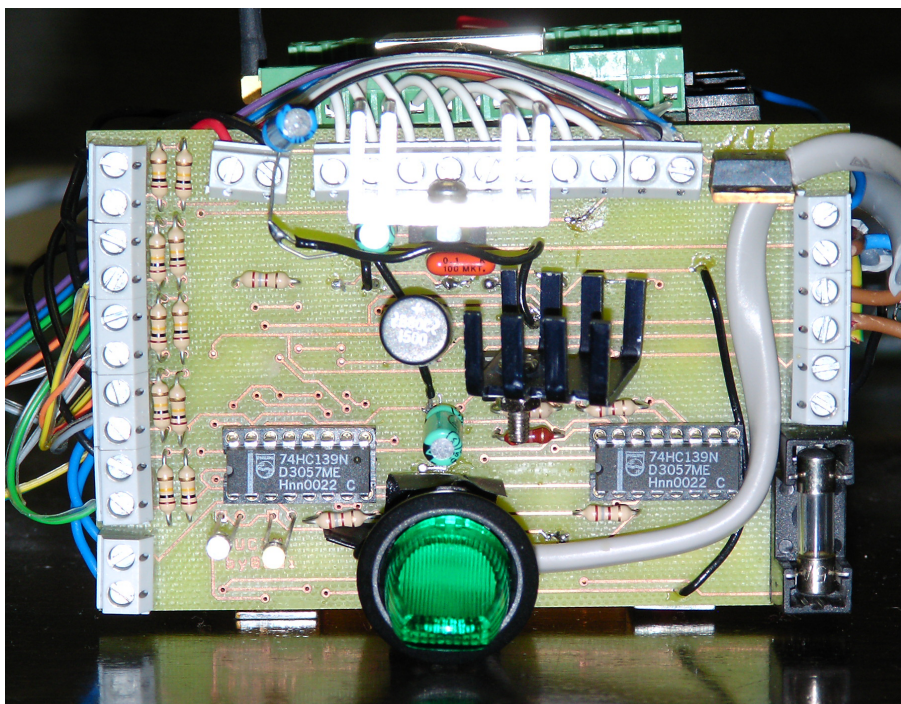


Figura 2.12. Montaje final del sistema domótico.

3

Diseño del software para el control local del sistema domótico

Una vez que se terminó de diseñar y se montó el hardware, se tuvo que desarrollar por completo el nuevo software que se grabaría en el microprocesador. El programa ahora debe contemplar la actuación de los sensores de proximidad, que deberían estar funcionando constantemente, y también el propio hecho de no utilizar un microprocesador dedicado específicamente para el control de las ventanas, sino que se utilizará uno cuya función principal es comunicarse a través de una red inalámbrica con varios sensores de luz y con una estación base.

A pesar de que el programa para controlar localmente las ventanas no tendría por qué tener ningún tipo de código de comunicación por radio, mientras no se implementase el control automático, se tuvo que programar teniendo en cuenta que el proyecto incluiría al final dicha comunicación —sino no tendría sentido utilizar este dispositivo— y se decidió, como no podía ser de otra forma, realizar la programación del microprocesador utilizando únicamente las bibliotecas de funciones que se incluían en la plataforma MoteWorks™, pensada exclusivamente para crear este tipo de redes inalámbricas.

3.1 Características funcionales del software desarrollado

Dado que ya existía un precedente previo en el que se había trabajado con el kit de Crossbow [Gom07], resultaba obvio que el diseño del nuevo software debería basarse en alguna medida en el ya desarrollado pero incorporando todas las especificidades y nuevas funcionalidades del nuevo sistema domótico desarrollado.

El software desarrollado debía cumplir una especificación muy concreta, consistente en que la ventana se pudiese ir aclarando u oscureciendo progresivamente en base a la información recibida a través de los sensores electroópticos. Así pues, para la realización de este código de demostración se optó por una de las opciones más sencillas, consistente en controlar tres muestras de PDLC, como si fuesen una única ventana, utilizando únicamente 2 sensores para dar las órdenes pertinentes, a pesar de que el hardware fuera diseñado para admitir hasta 4 ventanas que pudieran ser controladas hasta con 5 sensores.

La idea que se pensó inicialmente, y que finalmente se llevó a cabo, consistía en simular una rotación de paneles, con un modo de operación similar a los estores japoneses convencionales, como el que se muestra en la Figura 3.1.

Para poder controlar el movimiento de dichos paneles se pensó en que, simplemente, un sensor los rotara hacia la izquierda y otro hacia la derecha. Sin embargo, se consideró mucho más atractiva la idea de controlar este movimiento con el propio movimiento de las manos, en ambos sentidos, resultando algo mucho más natural, como si se abriera o se cerrara una ventana corredera.



Figura 3.1. Fotografía de un estor japonés colocado en una ventana. Nótese el control luminoso obtenido con el mismo.

Estaba claro que la programación resultaría mucho más complicada pero el resultado final sería mucho más elegante. Además, se pensó en que se les podría dar un peso virtual a los paneles para que estos se frenaran en función del mismo y se aceleraran en función de la fuerza aplicada sobre ellos. Obviamente, todo sería simulado pero el resultado sería mucho mejor. No obstante, el software se complicaría aún más y habría que ver hasta que punto tendría capacidad de responder el microprocesador.

En base a estas decisiones, se diseñó un software capaz de ponerse a contar el tiempo transcurrido desde que se dejara de tapar uno de los sensores con una mano hasta que se llegara a tapar el otro, proporcionando al panel virtual una velocidad inicial de rotación inversamente proporcional a dicho tiempo y del sentido correspondiente al del movimiento de la mano para, posteriormente, ir reduciendo dicha velocidad de manera constante hasta que cesara la rotación de los paneles. El grado de deceleración se fijó

como una constante que se podría cambiar sin tener que modificar el código del programa mientras que la velocidad inicial y el o los puntos donde se quisiera detener los paneles independientemente de su velocidad —si es que se opta por esta opción y no por permitirlos rotar constantemente en ambos sentidos— se tendrían que cambiar modificando directamente el código de programa.

El resultado final fue muy satisfactorio, a pesar de los problemas derivados del hecho de tener que estar constantemente muestreando las señales de los sensores de proximidad para poder captar, en la medida de lo posible, cualquier movimiento de las manos por rápido que fuese. Para concretar, el problema venía dado por el hecho de que, para poder aprovechar el hardware diseñado y reducir el consumo de los sensores, el número máximo de muestras se veía seriamente reducido, no por la capacidad de microprocesador, que permite obtener 15000 muestras por segundo a máxima resolución —10 bits y no 16 que da de resultado la tarjeta de adquisición de datos—, sino por las características del propio sensor, que requiere de un tiempo de:

$$t_{\text{sensor}} = (38,3ms \pm 9,6ms) + 5ms \quad (3.1)$$

donde el término entre paréntesis es el tiempo que tarda en realizar la primera medida y los 5 ms son el tiempo máximo que tarda en estabilizar la salida tras finalizar el muestreo.

Así pues, se tuvo que utilizar forzosamente una opción del software que permite excitar los sensores externos durante 50 ms antes de tomar la muestra. Por tanto, si se quisieran utilizar más sensores o se quisiera aumentar la velocidad de muestreo de los mismos, deberían alimentarse de manera continua con el consiguiente gasto de energía y, aun así, la velocidad de muestreo seguiría limitada por las funciones que trae el

software, ya que el tiempo entre muestra y muestra debe ser múltiplo de 100 ms.

De este modo se terminó la primera implementación del control local del sistema. Sin embargo, faltaba por implementar algo fundamental en este trabajo y que no sería exclusivamente controlada de forma remota: el control automático.

La idea era permitir al sistema controlar la transparencia de la ventana —o de las ventanas si fuese el caso— en función de la cantidad de luz que captase el sensor de luz inalámbrico correspondiente, aunque también podría haberse programado en función de la temperatura o de la humedad, ya que los sensores que venían con el kit también permiten realizar ese tipo de medidas e incluso más.

A continuación se pensó en cómo dar la orden de entrada en modo automático al sistema con los dos únicos sensores de proximidad disponibles.

Dado que resultaba lógico que todas las muestras tuvieran la misma transparencia cuando se fuese a trabajar con ellas como si se tratase de una única ventana, se pensó que la mejor forma de dar paso a este modo sería estableciendo previamente un nivel común a todas ellas y, dado que se estaban utilizando sensores de proximidad que permitían conocer la distancia a la que se encontrara el objeto detectado, se concluyó que la mejor forma de establecer dichos niveles sería en función de la distancia de la mano a uno de los sensores.

Por otra parte, para evitar que al pasar la mano por delante de dicho sensor se cambiase directamente el nivel de transparencia de las ventanas, cuando quizá sólo se pretendía hacerlas rotar, se decidió que sólo se actuaría en caso de que los dos sensores estuvieran detectando presencia, dándole la facultad de cambiar el nivel de la ventana al sensor derecho por

ser la mayoría de la población diestra y estableciendo mayor transparencia a la ventana cuanto más se alejara la mano por resultar más sencilla la implementación en este sentido pero siendo ambos factores cuestión únicamente de software.

Dado que las medidas de los sensores mostraban histéresis se tuvieron que establecer distintos niveles para cuando la mano se alejara y para cuando se acercara, teniendo que determinarlos experimentalmente, ya que las gráficas que aparecen en las hojas de características de los sensores no permitían hacer esta estimación de forma sencilla, y procurando que los saltos de nivel se produjesen de forma lineal, al igual que los niveles de transparencia en sí.

Por último se decidió que para establecer el modo automático se tuviera que retirar la mano izquierda, dejando este sensor destapado durante un corto periodo de tiempo —1,25 s aproximadamente—. No obstante, el modo no quedaría definitivamente establecido hasta que no se obtuviera una respuesta del sensor, ya que si este estuviese apagado no tendría sentido el modo automático, y así además se obtendría información directa acerca de cuando el sensor pudiera haberse quedado sin pilas.

En cuanto a la información ofrecida al usuario decir que el LED azul se asoció a la salida del LED verde de la tarjeta por su similitud y que, por tanto, el LED blanco quedó asociado a la salida del LED rojo. Su estado serviría para informar al usuario acerca del modo de trabajo de la manera que se muestra a continuación:

Estado de los LED	Modo de funcionamiento
Azul encendido y blanco apagado	Manual
Blanco encendido y azul apagado	Automático
Ambos LEDs apagados	Estableciendo el modo automático

El encendido simultáneo de ambos LEDs no tiene sentido porque sólo puede estar activo uno de los dos modos en cada momento. No obstante, de forma local no se ha establecido ninguna forma en concreto para pasar del modo automático al manual sino que se pasa directamente en cuanto el microprocesador recibe una orden manual, por lo que, visto así, se puede pensar que ambos modos están activos pero tampoco tendría sentido tener ambos LEDs encendido en este caso puesto que supondría una información redundante y un consumo extra en el circuito.

Por otro lado, el apagado simultaneo de los dos LEDs tampoco tendría sentido salvo en el caso de que las pilas del sensor estuvieran gastadas, ya que no tiene sentido apagar el sensor porque el sistema está pensado para no consumir prácticamente nada cuando está dormido y los sensores lo están salvo que se les indique lo contrario. Por tanto, si ambos LEDs permaneciesen apagados, durante más de un instante, sería señal de que hay que cambiar las pilas al sensor.

Por último decir que, cuando se enciende el sistema, éste trata de establecer el modo automático por lo que, en condiciones normales de uso y tras un instante, se debería encender el LED blanco, habiendo tomado como referencia de luz a mantener el nivel captado por el sensor en ese mismo instante. Este nivel dependerá de la transparencia con la que se inicialice la ventana, forzándose al estado de máxima transparencia en el programa de demostración pero pudiéndose cambiar fácilmente incluso con el valor de una constante.

3.2 Control remoto del sistema

El objetivo básico de esta parte es establecer un protocolo de comunicación entre el sistema local y el sistema remoto. Sin embargo, el control remoto conllevaba muchos más problemas consigo, ya que para ser funcional, de una forma que pudiera llegar a ser más o menos comercial,

fue preciso manejar un conjunto importante de herramientas informáticas y programar en diversos lenguajes como el NesC. Por tanto, el trabajo que se va a describir en este apartado va más allá del ámbito estricto de la implementación electrónica pero resultó imprescindible para la consecución de los objetivos marcados, a pesar de la carga extra que suponía.

El reto fundamental de esta parte del proyecto es que pudiera ser utilizado por cualquier usuario desde casi cualquier dispositivo con conexión a internet.

Para hacer esto posible, se creó un control de acceso al sistema mediante nombre de usuario y clave, datos que se almacenarían en una base de datos que estaría disponible gracias al sistema de gestión MySQL, diferenciando el acceso de un usuario normal y de un administrador del sistema.

Asimismo, se tuvo que crear un servidor de aplicaciones en el cual se alojaron páginas de servidor con tecnología Java (JSPs), *servlets* y una aplicación Flash® para definir el entorno gráfico con el que interactuaría de forma amigable el usuario final y que a su vez permitiría la comunicación con la red de sensores inalámbrica a través de *sockets* XML, para lo cual se tuvo que crear a su vez un servidor XML para permitir la comunicación por temas de seguridad, todo ello programado desde dentro de la propia aplicación Flash en ActionScript.

En el nuevo entorno gráfico (Figura 3.2) se puede ver un botón que indica si se ha podido establecer la comunicación con el microprocesador del sistema —nodo actuador—. También se puede observar la aparición de un cuadro denominado REFERENCIA MANUAL, desde el cual se podría establecer el nivel de luz que se desea tener en la habitación en cualquier momento, algo que no se podía hacer anteriormente y que tampoco se puede hacer localmente. Para hacer esta operación sólo se tiene que escribir

en él el número de luxes que se desea mantener. Mientras dicho valor sea distinto de 0, el valor de referencia automática no se tendrá en cuenta.



Figura 3.2. Entorno gráfico de la aplicación para control remoto mostrando el estado de inicialización.

Además de lo ya mencionado, también se ha actualizado la información del nivel de transparencia y la representación gráfica de los luxes frente al tiempo, así como la información mostrada al pasar el ratón por encima del círculo verde con las flechas rojas, que sirve para saber si el nodo sensor está despierto o no así como para cambiar su estado, ya que la información que aporta puede ser interesante y puede verse reflejada en este entorno gráfico, cosa que no tiene sentido cuando no existe ningún cliente conectado al sistema de forma remota, por lo que la única forma de despertar el nodo sensor, cuando se está interactuando con el sistema de forma local, es poniéndolo en modo automático.

Al igual que en la versión anterior y a diferencia del sistema de control local, para pasar de modo automático a modo manual es necesario pulsar el botón correspondiente y no sirve con dar una orden de cambio de transparencia directamente, aunque esto podría modificarse fácilmente. La información acerca del modo de funcionamiento se ve reflejada en la transparencia de los botones “manual” y “auto” que, en todo momento,

deberían ofrecer la misma información que los LEDs azul y blanco, los cuales se dispusieron de igual manera que estos botones, es decir, el azul informa acerca de que el modo manual está establecido a la izquierda y el blanco para informar acerca del modo automático a la derecha.

Se han definido tres comandos:

- a) Comando para transferir el nivel de luz de referencia.
- b) Comando para conocer el modo de funcionamiento del sistema —manual, automático o pasando de manual a automático.
- c) Comando para conocer el estado de transparencia de los PDLCs.

Aun así, se optó por introducir algún otro comando con el único objeto de pasar información del nodo sensor al Flash para poder depurar más fácilmente el código. Respecto a dichos comandos, el primero se tuvo que introducir como canal de comunicación para conocer en todo momento el nivel de luz de referencia en luxes mientras que el segundo serviría para informar del modo de funcionamiento asignando el valor 0 al modo de inicio automático, el 1 al modo automático y el 2 al modo manual, pudiendo de esta manera iluminar directamente los LEDs con la información almacenada en la variable correspondiente. Por último se tuvo que crear un comando para transmitir el estado de transparencia de los PDLCs que finalmente se fijó en 10, los cuales se pueden ver reflejados en la Figura 3.3.

A través del control remoto y en modo automático sólo se pueden controlar los estados principales —0, 3, 6 y 9—, en los que todas las muestras se comportan como una única ventana. El resto de estados son intermedios y sirven para producir el efecto de rotación de paneles. En el

caso de que un usuario remoto se conecte al sistema, la información del estado que le llegará será la más próxima al estado real de las ventanas, es decir, 0 si se encuentra en estado 1 —ó 0—, 3 si se encuentra en estado 2 o 4, etc.

Estado 0			
Estado 1			
Estado 2			
Estado 3			
Estado 4			
Estado 5			
Estado 6			
Estado 7			
Estado 8			
Estado 9			

Figura 3.3. Ejemplo de demostración de los diferentes estados de transparencia admitidos por la ventana de PDLc.

En la Figura 3.4 se puede ver la estructura del servidor en un diagrama de bloques. No obstante, los pormenores del mismo no se van a reflejar en este documento por resultar excesivamente tediosa su explicación.

Finalmente, cabría señalar que el compilado de los programas escritos en NesC con el software Programmers Notepad 2 puede realizarse directamente desde el menú *tools* de dicho software, siendo recomendable cerrar el Cygwin —entorno tipo Linux para Windows— durante la compilación, si está ejecutando algo, para que el tiempo de compilación sea lo menor posible. Para el correcto funcionamiento del sistema deben ejecutarse dos programas desde este entorno: uno para que el ordenador escuche y admita las solicitudes del cliente Flash para servir archivos XML por cuestiones de seguridad, mediante el envío de la política correspondiente, y otro para servir este tipo de archivos en sí.

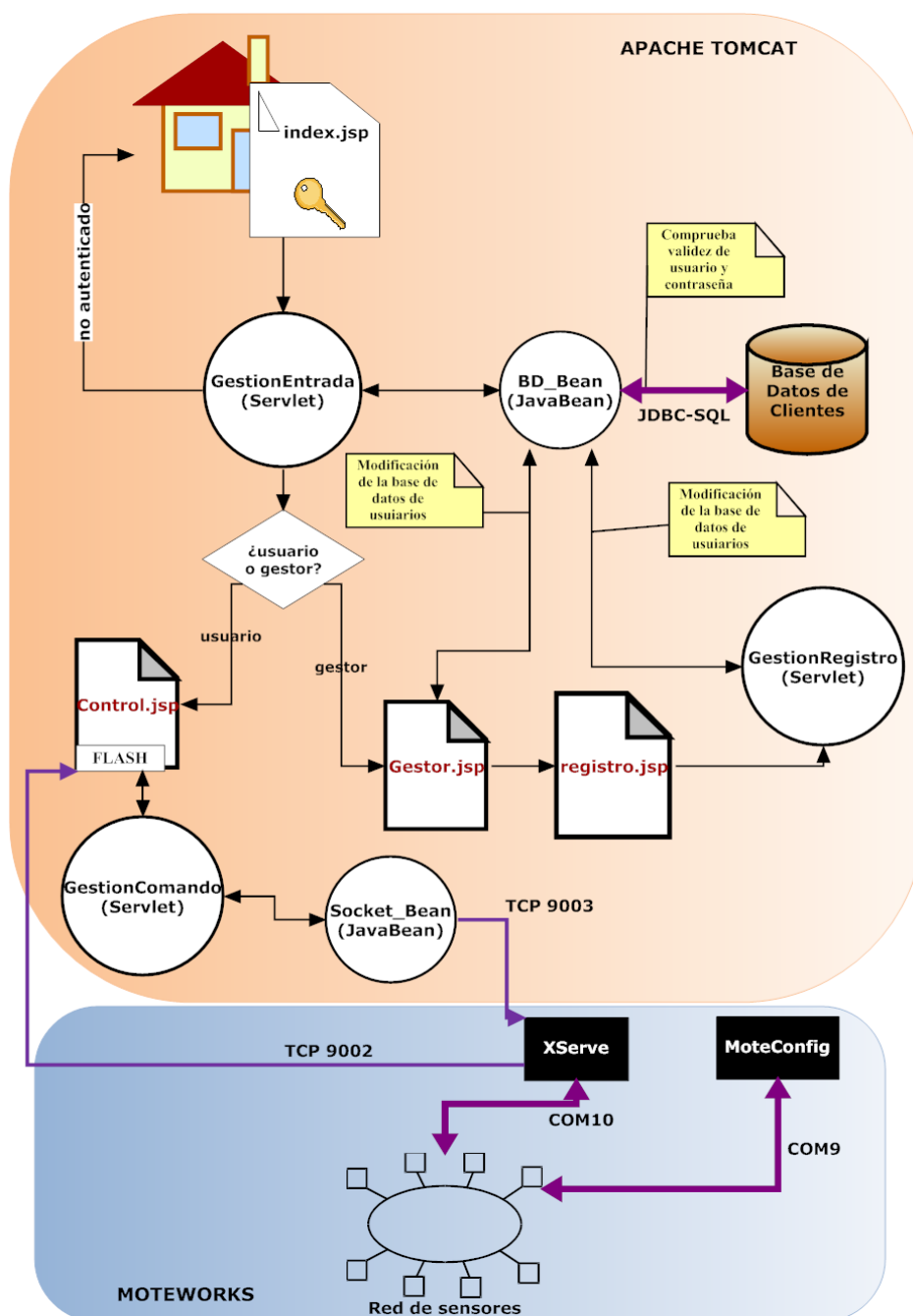


Figura 3.4. Estructura del servidor.

Para finalizar este capítulo, se va a proceder a resumir el proceso de comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos (MDA320) y el programa Flash en ambos sentidos.

3.3 Comunicación entre la MDA320 y el Flash

La comunicación en este sentido comienza cuando se transmite un mensaje de radio desde la tarjeta que va conectada a la propia tarjeta de adquisición de datos.

El microprocesador que incorpora la tarjeta transmisora se graba con un código escrito en lenguaje NesC previamente compilado. El programa se ha escrito para poder crear una red multisalto, es decir, una red que permita la comunicación entre los distintos elementos de la misma aunque no dispongan de comunicación directa entre los mismos.

Una vez la transmisión llega a la estación base que se encuentra conectada al servidor, el programa XServe —que debe estar ejecutándose desde Cygwin— debe interpretar los paquetes de datos recibidos para convertirlos al lenguaje XML.

Por último, los paquetes XML harán que salte una interrupción en el código de *actionscript* que se debería estar ejecutando en el Flash lo que conllevará su conversión y posterior interpretación.

Todo el proceso se ve resumido en la Figura 3.5.

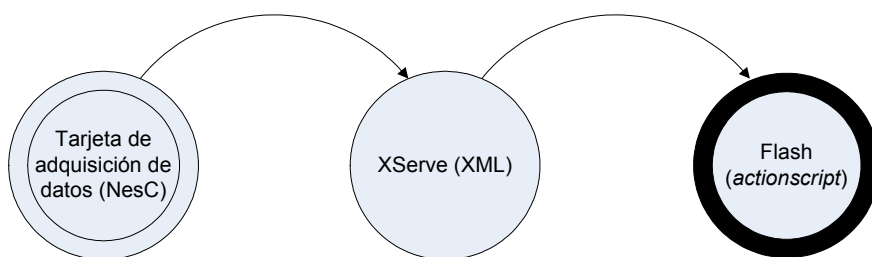


Figura 3.5. Diagrama de flujo de datos entre la MDA320 y el Flash.

3.4 Comunicación entre el Flash y la MDA320

La comunicación en este sentido resulta algo más complicada puesto que el Flash sólo da la orden de envío de la información pero ésta se crea aparte. El Flash sólo se encarga de crear un *socket* de XML al conectarse al sistema y ordena el envío de la información mediante una función de *actionscript* 1.0 que usa un objeto para pasar variables al servidor web y que lo que hace es comunicarse con un *servlet* escrito en Java, el cual debe encontrarse compilado en la carpeta correspondiente del servidor creado con TOMCAT.

El *servlet* crea un *socket* con *XServe* y devuelve el control a Flash y el programa *socket_bean* se encarga de guardar la conexión con el puerto 9003 —puerto asignado por defecto— de *XServe* y de dar formato al documento XML para enviar comandos.

Una vez le llega la información al *XServe*, éste se encarga de que le llegue el mensaje por radiofrecuencia al dispositivo correspondiente y el microprocesador puede reaccionar en consecuencia gracias a que, el programa escrito en Nesc, incluye una interfaz que dispone de un evento que salta cada vez que se recibe un comando XML.

Este proceso se puede observar en la Figura 3.6.

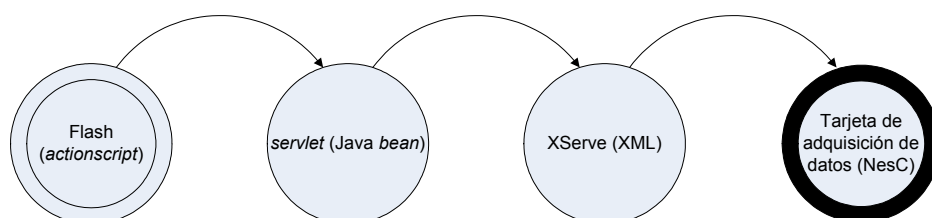


Figura 3.6. Diagrama de flujo de datos entre el Flash y la MDA320.

Desarrollo de un sistema visualizador basado en LEDs para vehículos especiales

Este capítulo está dedicado a explicar de forma detallada las diferentes fases de desarrollo de un sistema de visualización basado en LEDs para vehículos especiales —en concreto de las Fuerzas de Seguridad y Vehículos de Emergencias—. El prototipo realizado se encuentra actualmente en fase de producción por la compañía privada transnacional Radiotrans S.A. ubicada en Leganés. En el año 2012, el Grupo Radiotrans trasladará su sede central y oficinas en España al nuevo edificio que está construyendo en el Parque Científico-Tecnológico de Leganés (LegaTec).

Durante el año 2005 la compañía Radiotrans se puso en contacto con el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF) de la Universidad Carlos III de Madrid mostrando alto interés en el programa titulado “Fotónica Aplicada para la Creación de Tecnologías Ópticas y su Transferencia a Empresas Madrileñas” (FACTOTEM-CM) en el cual participaban las universidades Politécnica de Madrid (coordinadora), Universidad Carlos III, Universidad Rey Juan Carlos y Consejo Superior de Investigaciones Científicas de la Comunidad de Madrid. Este proyecto fue financiado por la Comunidad de Madrid dentro del programa destinado a

financiar Consorcios de Excelencia que tuvieran por objetivo transferir tecnología a las empresas radicadas en la dicha Comunidad.

Dicho contacto dio lugar a varios trabajos desarrollados en el GDAF para la compañía Radiotrans [Ale06, Paj06, Esc08] que fueron el origen o marco tecnológico en el cual se ha desarrollado este prototipo de señalización.

El valor añadido de este prototipo radica en que se realizaron todas las fases del proceso de industrialización de un producto desde la concepción teórica, diseño físico y mecánico del mismo, diseño electrónico y óptico, implementación física, caracterización y pruebas del mismo en régimen de operación idénticas a las reales, homologación del mismo conforme a la legislación europea y, finalmente, su transferencia a la empresa y su producción industrial. Hay que mencionar que se ha obtenido una patente por parte de la Oficina Española de Patentes y Marcas de este sistema [Oep09] con cobertura nacional. Asimismo se ha licenciado esta patente —cuya titularidad es de la UC3M y ha sido la primera patente licenciada en esta universidad al sector industrial— a la compañía Radiotrans para su explotación por un periodo de 20 años. El diagrama de bloques de la Figura 4.1 se encuentra recogido en el documento de la patente.

4.1 Diseño físico y mecánico del sistema

A finales del año 2005 se estableció contacto con la empresa de diseño MIL ASOCIADOS (Zaragoza) para que realizase un estudio preliminar de tipo geométrico —posibles carcasas que utilizaría el puente—, ya que el objetivo era realizar un prototipo homologado y que cumpliese los términos de una patente solicitada [Pen06]. Antes de acometer la implementación definitiva del sistema, se presentó un prototipo preliminar en la Feria de Madrid por la Ciencia del año 2006 en el que se utilizó una

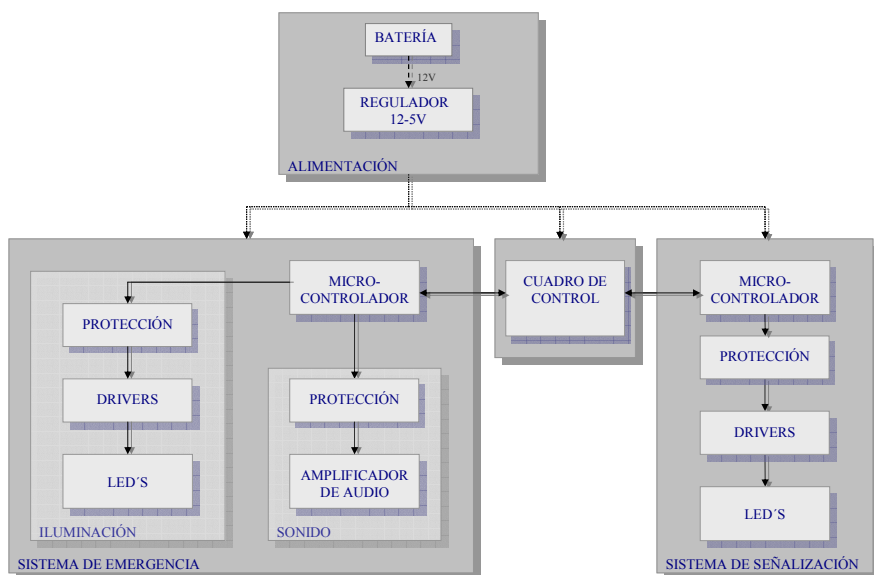


Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema de control del dispositivo de la invención.

electrónica diseñada completamente en el GDAF que permitía el control tanto de la parte óptica del sistema como de la parte sonora del mismo. Dichos diseños se realizaron en base a sendos trabajos realizados en el GDAF [Ale06, Paj06] e incluían un *driver* específico para controlar de manera óptima los LEDs de última generación adquiridos, una electrónica de potencia y de control para el altavoz del puente de luces y un mando para poder controlar tanto el sistema de luces —luces de emergencia azules y barra informativa trasera de color ámbar— como el sistema de sonido —altavoz y micrófono—. En la Figura 4.2 se puede observar el diseño patentado.

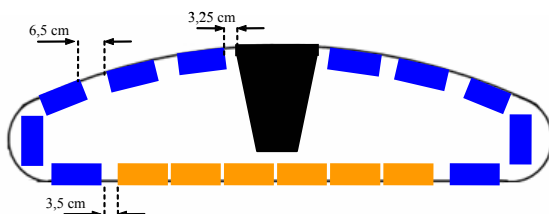


Figura 4.2. Vista en planta del dispositivo de la invención.

Durante el mismo año 2006 comenzaron dos nuevos trabajos para que la electrónica cumpliera con dos nuevas especificaciones solicitadas por la empresa para el citado prototipo: (i) comunicar el puente de luces con el interior del vehículo a través del mínimo número de cables y, (ii) permitir un control de la luminosidad del sistema para poder utilizarlo tanto de día como de noche.

El primer trabajo [Esc08] incluía además un mando para controlar el sistema remotamente y una aplicación para poder programar las secuencias de luces del sistema a través de un ordenador personal, mientras que el segundo trabajo, el cual pretendía controlar la luminosidad del sistema por hardware, no se llegó a terminar de implementar.

Dado que otra de las especificaciones por parte de la compañía Radiotrans era el reducir los costes del sistema al mínimo dejando incluso de lado el sistema sonoro, se procedió a realizar un nuevo sistema de control más simple y sin mando de control remoto pero pensado para admitir esta posibilidad en un futuro sin grandes modificaciones. En abril del 2007, tras recibir la carcasa en la que finalmente se montaría la electrónica diseñada, se pudo comenzar con el diseño definitivo del sistema para, posteriormente, proceder a la homologación del mismo.

El sistema final incluyó los LEDs más potentes y eficientes de la marca elegida en un principio así como las lentes adaptables a los mismos. Además, se diseñó un mando específico para controlar el sistema vía serie y se aprovecharon las luces intermitentes y los focos del puente elegido para utilizar su carcasa. El diseño de los soportes para el nuevo sistema corrió a cargo de la empresa MIL ASOCIADOS (Figura 4.3) y la homologación del sistema se realizó posteriormente, en la fase final de ejecución de este trabajo.

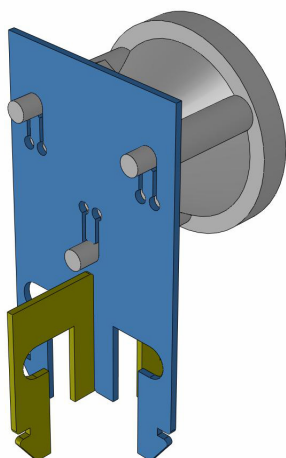


Figura 4.3. Soporte para las lentes de los LEDs diseñado por la empresa MIL ASOCIADOS.

4.2 Elección de componentes para el nuevo hardware

A continuación se detallan los diferentes mecanismos y pruebas realizadas para la elección óptima de los diferentes componentes hardware requeridos por el sistema, tanto a nivel óptico como electrónico. Se han tenido en cuenta en esta elección cuestiones como coste, prestaciones, volumen y peso de los componentes, modularidad, robustez y grado de adaptación al Reglamento n.º 65 de la Unión Europea [Une58].

4.2.1 Elección de los LEDs

Otra de las especificaciones del sistema que todavía no se ha mencionado es que la carcasa del puente de luces fuese de color azul. Así pues, se tuvo que desestimar el utilizar una carcasa transparente con una fuente de luz azul y quedaba decidir el color de la fuente de luz. La ventaja de haber elegido una carcasa transparente podría haber sido la obtención de una mayor cantidad de luz a través de ella. Sin embargo, esto no era una posibilidad así que se tuvo que elegir entre una luz blanca más potente y

una luz azul mucho menos intensa, en cualquier caso que pudiese cumplir el citado Reglamento n.º 65.

Por tanto, se tuvieron que efectuar unas pruebas preliminares para elegir entre los LEDs blancos y los azules, para decidir la solución óptima. En principio, se podría pensar que los LEDs blancos podrían ser más aptos al proporcionar mucha más potencia luminosa pero hay que tener en cuenta que la carcasa azul absorbería casi toda la luz que no fuese de su mismo color y además habría que comprobar si el color de la luz que finalmente atravesara la carcasa cumpliría con la cromaticidad exigida en el reglamento. Esto no sería necesario en el caso cosa que no de que se utilizaran LEDs azules puesto que emiten un color prácticamente puro de una única longitud de onda. No obstante, dicha comprobación se realizó antes de elegir este tipo de LEDs, elección que se fundamentó básicamente en la degradación que sufren los LEDs blancos con el calor. La pérdida de luminosidad que sufren se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4.4.

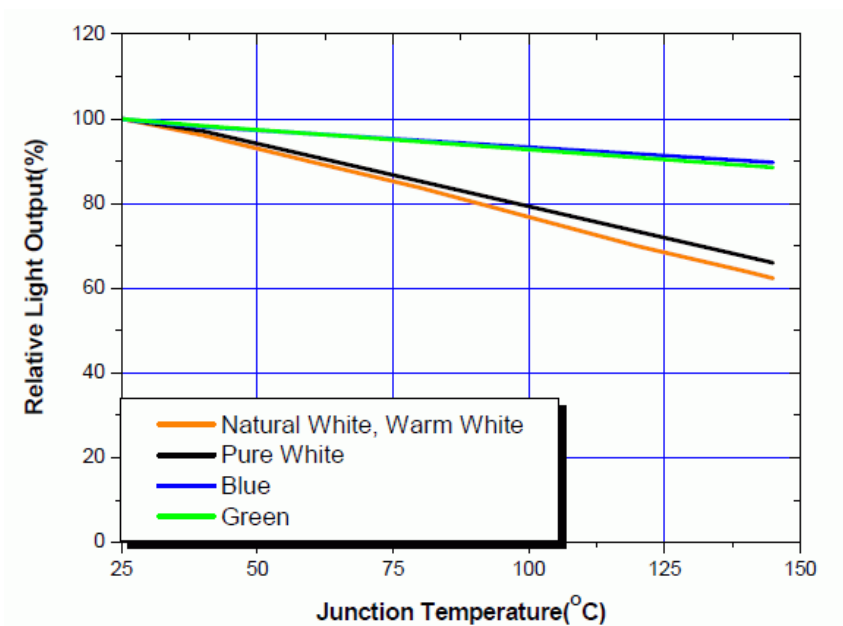


Figura 4.4. Luz relativa emitida por Z-Power LEDs de diferentes colores de la serie P4 para una corriente de polarización de 350mA frente a la temperatura de su unión.

Dicha degradación se pudo comprobar experimentalmente, ya que las pruebas para pasar la homologación suponían tener el puente de luces encendido durante media hora y, a pesar de que las luces tienen un ciclo máximo de trabajo del 40% impuesto por el reglamento, la degradación del color verde del LED con el que se hizo la comprobación fue tal que pasó de emitir una luz blanca brillante a emitir una luz tenue de color azul.

Una vez elegido el color de los LEDs que se utilizarían se procedió a comprobar si el color de su luz era adecuado para pasar la homologación del producto, tal y como se había supuesto inicialmente. Para realizar dicha comprobación se tuvo que utilizar un espectrómetro —modelo TS-425P de la corporación Acton Research— para captar la luminosidad del LED a través de la carcasa. Dichas medidas se realizaron para un rango de longitudes de onda entre los 400 nm y los 700 nm. Una vez ponderadas estas medidas con las coordenadas xyz del estándar CIE [Cie31] proporcionan las coordenadas de color a introducir en la carta de colores CIE. Los valores obtenidos de dichas coordenadas fueron $x = 0,1430$ e $y = 0,0497$ los cuales se comprenden dentro de los límites que el reglamento define con las 3 rectas que se pueden observar en la Figura 4.5.

Finalmente, se compraron unos Z-Power LEDs de la compañía Seoul Semiconductor de la serie P4, capaces de iluminar con un flujo de 22 lm en condiciones normales de temperatura y absorbiendo 350 mA, pudiendo llegar a admitir una corriente directa de 1 A con la que ofrecerían un flujo luminoso de 53 lm a través de un ángulo de apertura de 130° y con una longitud de onda típica de 465 nm. Estos LEDs se adquirieron montados sobre un soporte metálico en forma de estrella que haría las funciones de radiador y que facilitaría la soldadura de unos a otros, puesto que se acabarían uniendo en serie, en grupos de 3.

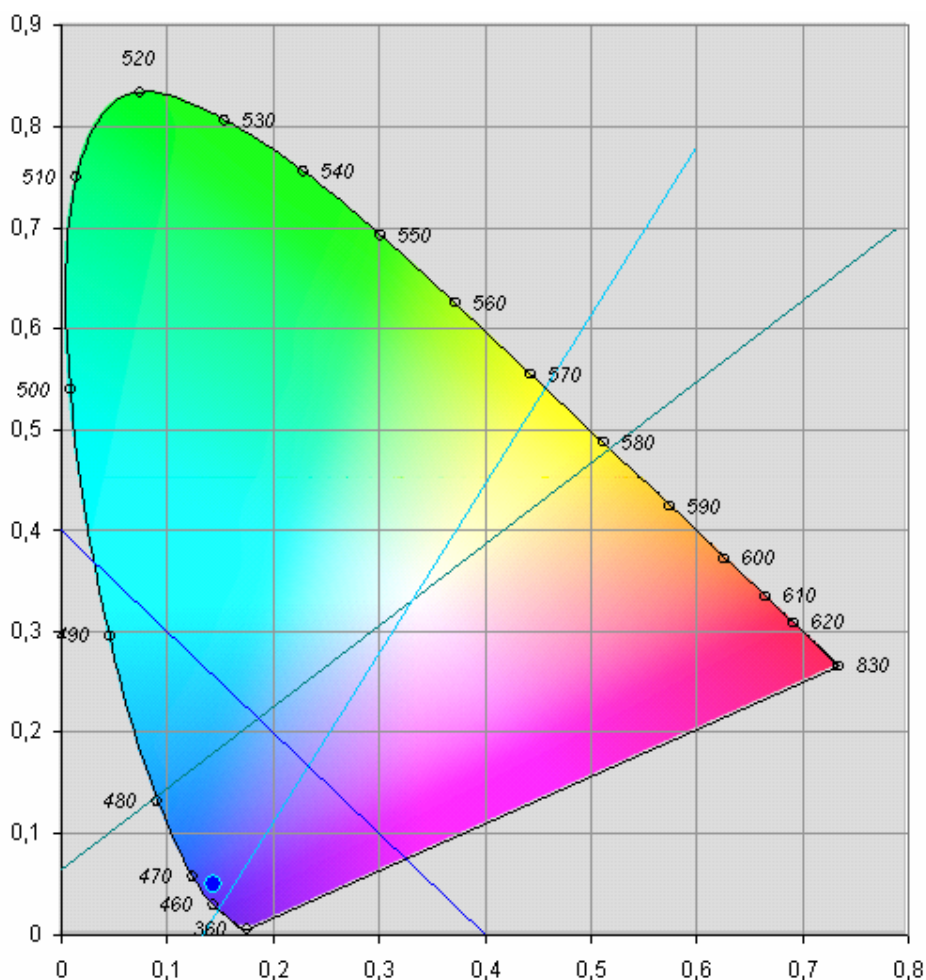


Figura 4.5. Coordenadas cromáticas del tipo de LED utilizado marcadas con un punto azul sobre el triángulo de colores CIE, dentro de la zona delimitada por el reglamento con 3 rectas.

Durante el proceso de elección de los LEDs también se tuvo que decidir cuál sería la forma idónea de colocarlos en el puente de luces y se tuvo que estimar la potencia lumínica que proporcionarían para saber si se podría obtener el certificado de homologación.

Dado que los coches llevan una batería que proporciona 12 V aproximadamente se decidió desde un principio que se deberían formar bloques de 3 LEDs en serie para aprovechar al máximo dicha tensión, ya que en cada LED de la serie P3 —serie con la que se tuvo que trabajar

hasta la aparición de la serie P4— caerían 4 V en condiciones normales de uso. No obstante, tanto la disposición óptima de los LEDs como la estimación de las candelas que se obtendrían de ellos resultaron ser dos puntos de difícil resolución.

Antes de pensar en cómo colocar los LEDs era imprescindible saber cuántos LEDs serían necesarios, así que se procedió a comprar unos LEDs de muestra para poder realizar las mediciones pertinentes y unas lentes para poder sacarles el máximo partido. La elección de las lentes también estuvo clara en todo momento ya que la zona que debe iluminar un puente de este tipo es prácticamente un plano. En concreto, el reglamento sólo dice que para este tipo de iluminación es necesario que la luz proyectada por el puente a $\pm 4^\circ$ del plano horizontal que forma debe ser al menos la mitad que en el propio plano.

Así pues, era más que interesante incorporar a los LEDs unas lentes que cerraran el cono de proyección de 135° en el eje vertical lo suficiente como para cumplir el reglamento y aprovechar al máximo la luz emitida pero que dejaran abierto en la medida de lo posible el ángulo horizontal para poder cubrir los 360° , tal como exige el reglamento, utilizando el menor número posible de LEDs. Con estos datos se optó por la única y mejor opción posible, que fueron unas lentes de elípticas que cerrarían el ángulo en la vertical hasta los 15° , permitiendo de este modo aprovechar al máximo la luz y permitiendo que ésta llegase a los ángulos de $\pm 4^\circ$, y cerrando el ángulo tan solo hasta los 90° en la horizontal, permitiendo de este modo cubrir los 360° con un número mínimo de LEDs. Una vez adquiridas las muestras, se procedió a unir 3 LEDs en serie a los que se les incorporaron sus respectivas lentes.

A continuación se estimó el número de candelas que emitía cada LED. Lo fundamental era saber cómo realizar el cálculo de las candelas

eficaces emitidas (J_e) cuya fórmula viene dada en el propio reglamento y se puede observar a continuación:

$$J_e = \frac{J_m}{1 + \frac{C}{F \cdot T}} \quad (4.1)$$

donde J_m es la intensidad de pico en candelas, C es una constante de tiempo cuyo valor es 0,2 s, T es el periodo de tiempo y F es un factor de forma definido como:

$$F = \int_0^T \frac{J dt}{J_m T} \quad (4.2)$$

donde J es la intensidad instantánea medida en candelas.

Dado que el encendido de los LEDs se realizaría finalmente de la forma más sencilla posible, es decir, mediante una señal continua, es fácil darse cuenta de que J_m coincidiría con J . Además T sería una constante por lo que el número de candelas efectivas podrían finalmente calcularse mediante la Ecuación 4.3.

$$J_e = \frac{J_m}{1 + \frac{0,2}{T_{on}}} \quad (4.3)$$

y dado que el máximo tiempo de encendido de cada LED viene fijado en el reglamento como $T_{on} = 0,4/f = 0,4 \cdot T$, la máxima intensidad lumínica que se podría obtener vendría dada por la Ecuación 4.4.

$$J e_{\max} = \frac{J m}{2} \quad (4.4)$$

Ahora ya sólo faltaba realizar las mediciones pertinentes de $J m$ para poder estimar las candelas eficaces que finalmente podría llegar a proporcionar el prototipo. El proceso para pasar las mediciones a candelas fue el siguiente:

1. Obtener la medida en $\text{mW}/\text{m}^2 \text{ nm}$
2. Pasar los $\text{mW}/\text{m}^2 \text{ nm}$ a lm/m^2
3. Pasar los lm/m^2 a $\text{cd} [\text{lm}/\text{sr}]$
4. Calcular el aporte final del LED en candelas efectivas

Para poder llegar a obtener una medida en $\text{mW}/\text{m}^2 \text{ nm}$ se tuvo que calibrar una lámpara gris (patrón) en el laboratorio del CSID. Después se tuvieron que efectuar las mismas medidas con el espectrómetro del laboratorio del GDAF para así obtener un vector de calibración que multiplicado por cualquier medida realizada con el espectroscopio, en las mismas condiciones, daría el resultado en $\text{mW}/\text{m}^2 \text{ nm}$.

El paso a lm/m^2 se realizaría calculando la integral del resultado anterior ponderada con los valores de la curva fotométrica —respuesta espectral triestímulo $V(\lambda)$ — que se puede obtener en la web oficial del CIE [Cie31] y que no es otra que el vector de coordenadas y del estándar de 1931 tal y como se pudo comprobar en base a la tabla de valores de medida que facilitó el propio laboratorio de homologación. Dicha comprobación se puede ver reflejada en la Figura 4.6.

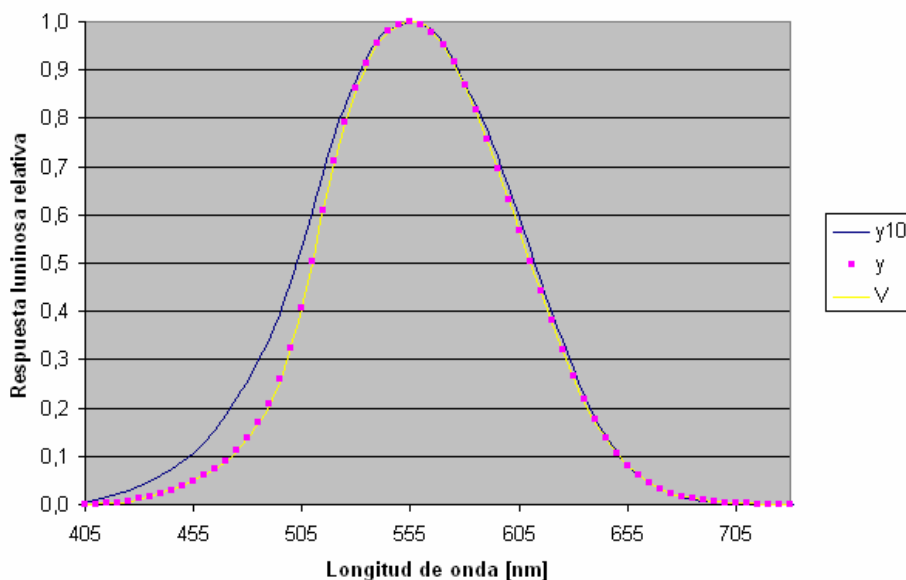


Figura 4.6. Comparación de la curva fotométrica utilizada en el laboratorio de homologación con las curvas de 1931 y de 1964.

Dado que 1 lm/m^2 equivale a 1 cd a una distancia de medida de 1 m, la conversión a candelas se obtendría con tan solo multiplicar por la distancia de medida real al cuadrado. Las distancias que se probaron fueron varias, desde los 0,5 m en que se calibró la lámpara gris con los que se saturaba el espectrómetro, hasta los 2 m pasando por 1m para comparar los resultados que podían llegar a diferir considerablemente. Las medidas a los 25 m que establece el reglamento no pudieron realizarse por la ubicación del espectrógrafo en sí, por el tamaño del laboratorio y por la dificultad que hubiese supuesto orientar la luz emitida hacia la fibra óptica de entrada al espectrógrafo. No obstante, sí que se tuvo en cuenta que el diámetro angular del receptor fotoeléctrico no superara los 10 minutos de arco tal y se establece en el anexo 5 del reglamento.

Por último, el aporte máximo de candelas efectivas se realizó dividiendo el número de candelas obtenido entre 2 según la fórmula

calculada anteriormente y, en base a todas las medidas realizadas y a lo anteriormente expuesto, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Para obtener la máxima intensidad lumínica de los LEDs estos deben alimentarse con tensión continua.
2. Las medidas no se verían muy afectadas por el ángulo de salida de la luz a través de la carcasa siempre y cuando la distribución de los LEDs fuese uniforme.
3. No debería haber ningún problema para cumplir con el mínimo número de candelas a $\pm 4^\circ$ si se obtienen las suficientes en la horizontal.
4. Se necesitarían al menos 5 LEDs trabajando en condiciones normales para poder obtener la homologación para utilizarlo de noche.

Por lo tanto, considerando que el ángulo horizontal que cubriría finalmente cada LED de forma efectiva no superaría los 65° tras cerrarlo con la lente correspondiente y teniendo en cuenta que la intención era unir los LEDs en grupos de 3 para aprovechar al máximo los 12 V de alimentación disponibles, se llegó a la conclusión de que lo mejor sería cubrir los 360° con 30 LEDs divididos en 5 grupos de 3 LEDs a cada lado del puente, ya que con sólo 4 grupos de LEDs a cada lado tan solo se llegarían a superponer los haces de 4 LEDs — $65^\circ \times 24 \text{ LEDs} / 360^\circ = 4,34 \text{ LEDs}$ —. Eso sí, la distribución de estos debería ser uniforme en cuanto al ángulo de separación entre ellos, es decir, que el ángulo entre LED y LED debería ser siempre de $360^\circ / 30 = 12^\circ$ para conseguir siempre superar la iluminación mínima. La disposición final de los LEDs fue establecida por MIL ASOCIADOS teniendo en cuenta esta consideración, quedando como se muestra en la Figura 4.7.

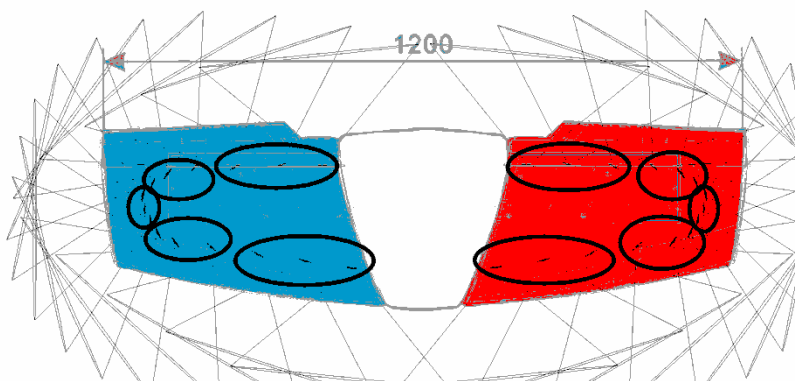


Figura 4.7. Disposición final de los LEDs y estimación de su rango de iluminación.

4.2.2 Elección de los componentes electrónicos

La elección del resto de componentes del sistema resultó mucho más sencilla. Dado que la compañía Radiotrans quería que el diseño fuese lo más barato posible y que se esperaba aprovechar por completo la tensión de alimentación disponible, se decidió eliminar las placas de los *drivers* inicialmente diseñadas en el prototipo anterior, las cuales incluían una serie de protecciones innecesarias en los vehículos actuales ya que la alimentación que proporcionan ya viene regulada. Así pues, se decidió controlar la intensidad que pasara a través de los LEDs con una simple resistencia y un interruptor hecho con un transistor MOSFET controlado directamente desde un microcontrolador.

Para controlar el sistema se consideró suficiente el microcontrolador AT89C2051 que tiene las ventajas de tener tan solo 20 pines y de estar disponible en encapsulado DIP por lo que en cualquier momento podría extraerse de la placa y ser sustituido por otro con una nueva programación del juego de luces o cualquier otra cosa que fuese necesaria, sin tener que sustituir la placa entera. El único problema que podía tener este microprocesador era que su escaso número de pines fuera insuficiente pero resultó ser el exacto ya que dispone de un puerto

completo de 8 canales y de otro de 7 canales y para poder controlar completamente el sistema serían necesarios justamente esos 15 canales: 10 para cada bloque de luces de emergencia, 2 para los intermitentes, 2 para los focos y 1 para recibir a través del puerto serie las ordenes enviadas desde el mando de control. El diagrama de bloques de este componente se puede observar en la Figura 4.8.

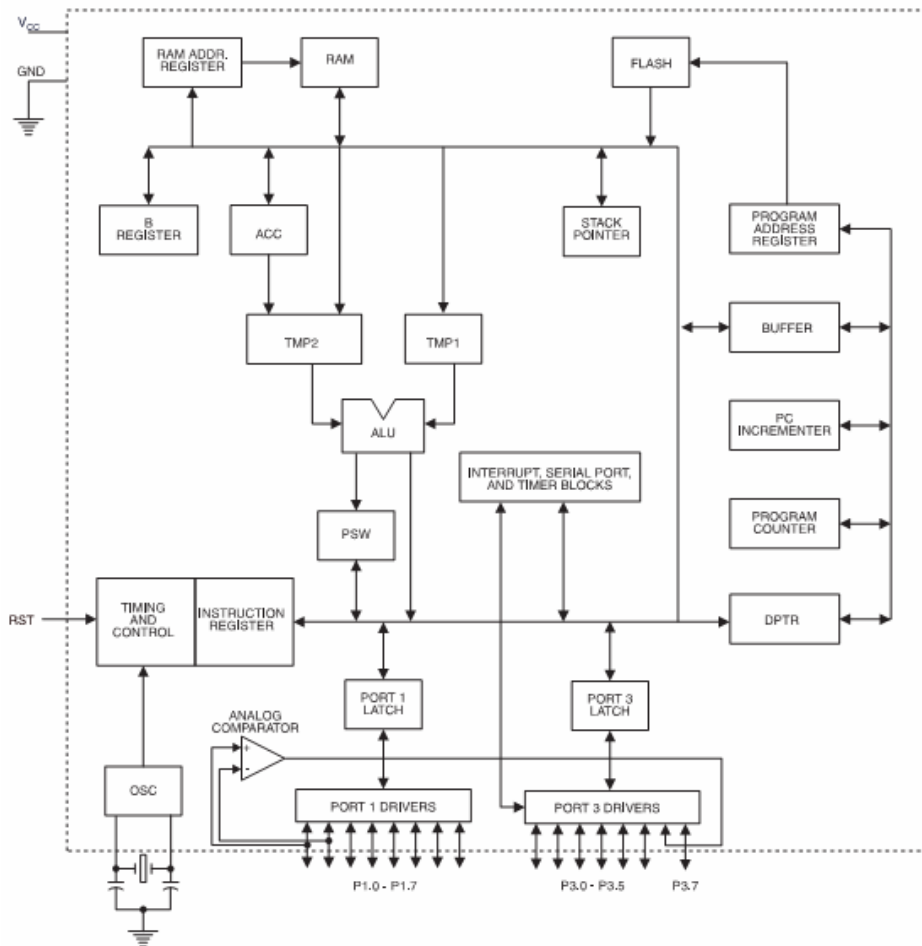


Figura 4.8. Diagrama de bloques del microcontrolador AT89C2051.

Una vez elegido el microprocesador se eligió el reloj que le marcaría la velocidad de procesamiento, que fue un cristal de cuarzo de 11,0592 MHz,

estable, susceptible de ser soportado por este microprocesador —máximo 24 MHz—. Además era lo suficientemente rápido incluso como para añadirle el control de un altavoz e ideal para obtener frecuencias exactas tanto para establecer una comunicación serie que nunca pierda su sincronismo como para obtener la frecuencia de 2 Hz necesaria para obtener la máxima iluminación del sistema así como para hacer que parpaddeen los intermitentes si se considerase oportuno —la frecuencia de las luces de emergencia debe estar entre 2 y 4 Hz mientras que la de los intermitentes debe estar entre 1 y 2 Hz—. Dicho reloj se uniría a la masa del sistema con unos condensadores de 33 pF, valor estándar comprendido entre los 20 y los 40 pF que se fijan como límites en las hojas de características del microprocesador.

El resto de los elementos necesarios para el funcionamiento del microprocesador fueron 2 resistencias de *pull-up* en los pines 12 y 13 para poder establecer los puertos correspondientes como salidas ya que dichos pines no las poseen internamente puesto que también se pueden utilizar como entradas al comparador analógico, un circuito de *reset* que se decidió realizar sin pulsador manual y de la forma más sencilla posible, con una resistencia de 4,7 k Ω como las de los pines 12 y 13 y un condensador electrolítico de 1 μ F y, por último, un regulador de tensión 7805 con los condensadores sugeridos para su funcionamiento para alimentarlo.

El transistor elegido como interruptor para los distintos bloques de LEDs, incluidos los de color ámbar y los blancos, fue el IRF730 por su disponibilidad, su precio y sus características más que suficientes incluso para no calentarse trabajando con él a la máxima potencia del sistema —soporta 5,5 A y 400 V.

Por último se tuvieron que elegir las resistencias que controlarían la corriente que pasaría por los bloques de LEDs azules. Su valor se estimó considerando que sería suficiente trabajar con los LEDs en condiciones

normales, las cuales habrían sido unos 350 mA y 9,75 V —3,25 V * 3— para los módulos P4 utilizados, lo que supondría a la postre un menor consumo del sistema pero una eficacia menor, por lo que el valor final se pudo calcular mediante la fórmula de la Ecuación 4.5.

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{ds} - V_{\gamma}}{I_d} \quad (4.5)$$

Considerando $V_{cc} = 12$ V, $I_d = 350$ mA, $V_{\gamma} = 9,75$ V y V_{ds} un valor entre 0,2 y 0,5 V por lo que se decidió poner resistencias de 5,6 Ω y 1 W, ya que las pérdidas por calor en cada resistencia supondrían:

$$P_{p\acute{e}rdidas} = 5,6 * 0,35^2 = 0,686W \quad (4.6)$$

y, a pesar de que su ciclo de trabajo máximo sería del 40%, se pensó que tal vez hubiera que aumentar al final la potencia de trabajo de los LEDs. Dado que se pudieron encontrar resistencias de montaje superficial de estas características, se decidió que éstas serían las más oportunas por su escaso tamaño, por evitar tener que hacer excesivos agujeros en la placa sobre la que se montaran y, también, para poder reducir su valor nominal fácilmente en caso de que fuera necesario —y así hacer trabajar a los LEDs por encima de su valor nominal—, ya que este tipo de resistencia permite soldar una sobre otra dividiendo por dos su valor y multiplicando, por tanto, la intensidad que podría circular por el circuito correspondiente.

4.2.3 Elección del mando de control y electrónica asociada

En cuanto al mando de control, se decidió utilizar el mismo microcontrolador y los mismos circuitos de reloj, reset y alimentación. No

obstante, las resistencias de *pull-up* externas se omitieron puesto que la configuración del teclado así lo permitió.

Se decidió utilizar un teclado matricial de 4x4 como en el prototipo anterior pero su distribución se hizo a lo largo, obteniéndose un teclado de 2 filas y 8 columnas. Esta decisión se tomó pensando en montar todo el circuito sobre una placa de tamaño equivalente al de un equipo de audio estándar para coches, ya que los coches suelen disponer de varios huecos de este tamaño y así se podría empotrar el mando en uno de esos huecos.

Para realizar los botones del teclado se eligieron unos interruptores táctiles en función del tamaño disponible y de su disponibilidad en sí, a los cuales se les añadieron unas tapas redondas de distintos colores dependiendo de la función que implementarían: roja para el apagado de toda las luces, negras para el control de los focos —ya que no había blancas—, azules para los distintos juegos de luces de emergencia y amarillas para el control de los intermitentes —ya que no había de color ámbar—. Asimismo se tuvo en cuenta la disponibilidad de interruptores iguales pero más pequeños para cuando se quisiera diseñar un mando de control remoto.

De este modo, el aspecto del mando, que se puede observar en la Figura 4.9, quedó determinado en base a su forma, a su tamaño y a la botonera que se eligió para él.

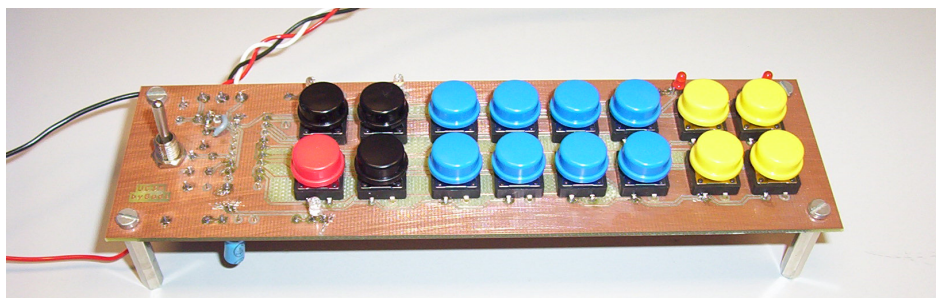


Figura 4.9. Aspecto del mando de control diseñado.

No obstante, todavía quedaba añadir unos elementos importantes al mando: indicadores para saber en todo momento, desde dentro del vehículo, que luces se encuentran encendidas. Para tal fin, se eligieron unos LEDs pequeños pero capaces de dar la suficiente intensidad lumínica, los HyperLED 3MM de OSRAM, que además se encontraban disponibles en todos los colores necesarios —azul, blanco y ámbar— y, por si fuera poco, se pueden alimentar directamente desde el microprocesador, ya que tan solo necesitan 20 mA para funcionar en condiciones normales los LEDs azules —menos eficaces— que es justo la intensidad máxima que puede dar —admitir, en realidad— cada canal del microprocesador elegido. Así pues, se procedió a elegir las resistencias que limitarían la intensidad que atravesaría cada LED, elección que se basó en la eficacia de cada uno de ellos: 2 lm/W los azules, 6 lm/W los blancos y 11 lm/W los de color ámbar. Teniendo en cuenta la tensión en polarización directa de cada uno —2 V los ámbar y 3,1 V los demás— se plantearon las siguientes igualdades: $2 \cdot 3,1 I_b = 6 \cdot 3,1 I_w = 11 \cdot 2 I_a$. Y considerando $I_b = 20$ mA por ser los LEDs azules los menos eficaces se pudieron obtener las demás intensidades necesarias para que todos los LEDs iluminaran por igual sin que ninguna de ellas superara los 20 mA, obteniéndose los siguientes resultados: $I_w = 6,67$ mA e $I_a = 5,64$ mA. Dado que se decidió poner un único LED para informar de todos los juegos de luces de emergencia, uno blanco para cada foco pensando en poderlos controlar por separado y otros dos de color ámbar, uno para cada intermitente, la intensidad máxima que se le exigiría al microprocesador sería de $20 + 2 \cdot (6,67 + 5,64) = 44,62$ mA, valor muy inferior a los 80 mA que podría llegar a suministrar. Las resistencias buscadas, deberían tener por consiguiente los valores mostrados en la Ecuación 4.7.

$$\begin{aligned}
 R_b &\geq \frac{5 - 3,1}{0,020} = 95\Omega \\
 R_w &\geq \frac{5 - 3,1}{0,00667} = 285\Omega \\
 R_a &\geq \frac{5 - 2}{0,00564} = 532\Omega
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Eligiéndose los valores nominales de 120 Ω , 330 Ω y 580 Ω , desestimándose el valor de 100 Ω para el LED azul por tratarse de un valor crítico, ya que si el LED exigiese más de 20 mA al canal correspondiente del microprocesador, éste podría quemarse.

Por último reseñar que, con todas estas conexiones se aprovechan una vez más al 100% los canales disponibles en el microprocesador, ya que de los 15 se utilizan 8 para controlar el teclado, 5 para controlar los LEDs y uno para transmitir las órdenes al microprocesador ubicado en el puente de luces, quedando únicamente un canal libre que es precisamente el de recepción de datos vía serie —pin 2— por si se quisiera añadir un mando de control remoto al sistema, ya que dicho control se implementó en el prototipo anterior con un dispositivo capaz de comunicarse con cualquier microprocesador vía serie y en ambos sentidos, aunque se pudieran utilizar las versiones que tan sólo permiten enviar o recibir datos. La decisión de no implementar este sistema vino dada básicamente por la especificación de obtener un producto cuyo coste fuese mínimo ya que, a pesar de que el control remoto le daría un valor añadido al producto por el hecho de que resultaría más sencillo en una situación de emergencia apagar las luces del coche para preservar su batería, el coste del dispositivo de radio encarecería de forma apreciable el producto final.

4.3 *Diseño electrónico y ensamblaje mecánico del sistema visualizador*

Una vez elegidos todos los componentes que formarían parte del sistema se procedió a la realización del diseño en sí, tanto de la placa de control, qué iría montada en el puente de luces, como de la placa del mando de control del sistema. Ambos diseños se realizaron con la misma herramienta comercial que se utilizó en el proyecto de domótica: OrCAD 10.

Lo primero que era necesario establecer era el tamaño de la placa de control. Sin embargo, esta decisión no resultaba obvia ya que la placa debería montarse sobre un soporte y dicho soporte debería estar convenientemente preparado para poder alojarla. Dado que el diseño del soporte iba cronológicamente por delante del diseño electrónico se optó por hacer una matriz de taladros en el soporte para que no solo se pudiera montar sobre él cualquier tamaño de placa sino también para poder aumentar el tamaño de la placa en un futuro si fuera necesario —para añadir el dispositivo de radiofrecuencia, por ejemplo— o, incluso, para poder añadir una nueva placa al sistema para controlar un altavoz o cualquier otra cosa.

Las placas de soporte del prototipo se puede observar en la Figura 4.10, así como los *silentblock*, utilizados para unirlos al puente de luces evitando así vibraciones en el sistema, y las pegatinas azules que se diseñaron para tapar las zonas transparentes del puente de luces en caso de no usar LEDs azules. Para evitar vibraciones en los LEDs en sí, al anclaje de sus soportes a la placa se les añadió silicona en caliente.



Figura 4.10. Placa de soporte para los módulos de LEDs y para la placa de control del sistema.

Una vez se recibieron estas placas en el laboratorio del GDAF se diseñó la placa de control con ORCAD. En la Figura 4.11 se muestra el esquema en el que se basó el diseño de la PCB. La Figura 4.12 muestra, a escala real, tanto el emplazamiento de los componentes como el diseño de las pistas principales del sistema, omitiéndose únicamente los planos de cobre que se utilizaron para fijar la masa del sistema y la tensión de alimentación de 12 V.

El emplazamiento de los componentes en esta placa se hizo de una manera lógica, intentado buscar la máxima eficiencia en el aprovechamiento del espacio: todos los conectores en los bordes de la misma, los conectores de las luces de la mitad derecha del puente ordenados a la derecha y los de la parte izquierda colocados de manera equivalente, quedando únicamente en posiciones de más difícil acceso los conectores de los focos que deberían estar en la parte superior de la placa pero que se tuvieron que colocar en la parte inferior porque los únicos

canales del microprocesador que los controlarían se tuvieron que obtener de la parte inferior del mismo.

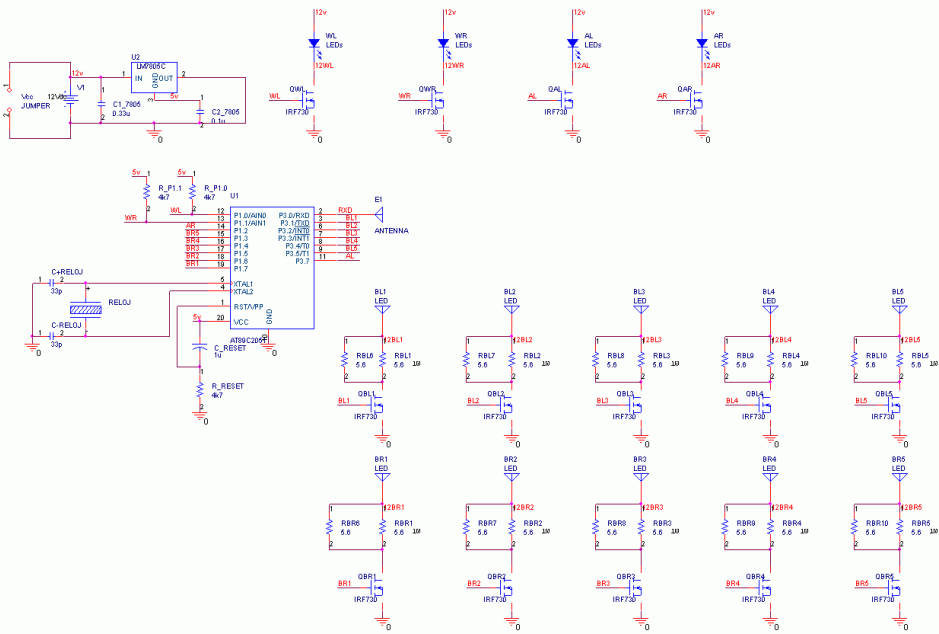


Figura 4.11. Esquema de la placa de control de las luces de emergencia.

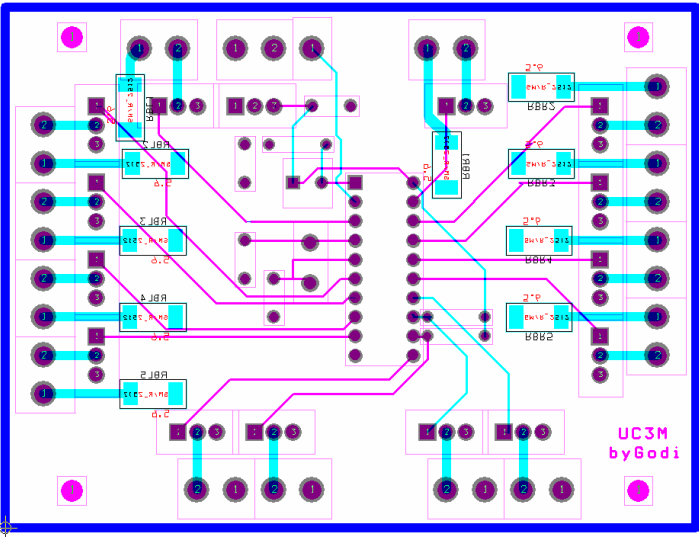


Figura 4.12. PCB del sistema de control de las luces de emergencia.

Los transistores se colocaron junto a los respectivos conectores y las resistencias se dispusieron de igual modo pero en la capa inferior de la placa para facilitar el diseño de las pistas, especialmente si no se pudiesen metalizar los taladros de la placa, teniendo en cuenta que al ser de montaje superficial no estorbarían en esa zona, cosa que sí harían los transistores por su altura.

El microprocesador se dejó ocupando la parte central de la placa, montándolo sobre un zócalo y con un hueco de acceso directo para poder sacarlo cuando fuera necesario.

El reloj se colocó lo más cerca posible del microprocesador y lo mismo se hizo con el circuito de *reset* y con el de alimentación, el cual se tuvo que colocar en la parte superior de la placa.

Por último, señalar que la anchura de las pistas por las que más corriente circularía se fijó en 50 milésimas de pulgada —1,27 mm—. Dicha anchura no se fijó en ese valor de forma aleatoria ni por ser prácticamente la anchura de los *pads* de los transistores, sino que se estimó considerando un espesor del cobre de 0,03 mm, condiciones normales de temperatura y que la máxima corriente que circularía por ellas sería de 1 A, teniendo en cuenta, además, que se trata de pistas que se encuentran situadas en el exterior de la placa.

Asimismo, considerando que el ciclo de trabajo máximo de las luces de emergencia es del 40%, con esta anchura las pistas deberían poder soportar el paso de hasta 2,5 A, dejando un amplio margen a los 350 mA de consumo nominal a 12 V de las luces de emergencia, a los 480 mA de los intermitentes y a los 180 mA de los focos, consumos medidos alimentando los LEDs a través del transistor IRF730.

Respecto al panel de control, el tamaño se fijó en 7x2 pulgadas —lo que equivale a unos 18x5 cm—, que es aproximadamente el tamaño disponible en un coche para insertar un dispositivo de audio. El esquema de su diseño (Figura 4.13), tuvo como únicas complicaciones dos cuestiones relativas al hardware del microprocesador: el hecho de no poseer resistencias de *pull-up* internas en los pines que dan acceso al comparador analógico y la arquitectura de las salidas en sí que suele ser igual en toda la familia de microprocesadores y que no permite que salga intensidad de los pines del microprocesador ya que ésta debería salir por las resistencias de *pull-up* internas y no por un transistor, por lo que los dispositivos que se quieran activar por corriente deberán activarse a nivel bajo. No obstante, ambos problemas se pueden solventar por software y así se hizo.

Una vez finalizado el esquema electrónico, se procedió a hacer el diseño de la PCB en sí, el cual se puede apreciar también en la Figura 4.14. Se decidió poner un interruptor de palanca a la izquierda del panel para poder desactivarlo completamente en un momento dado, así que se procedió a crear una huella para dicho interruptor. Asimismo, se crearon huellas para los interruptores táctiles de 12x12 mm así como para los LEDs indicadores.

De nuevo la colocación de los componentes en la placa acabó por definirla en su resultado final. Los 16 botones se colocaron centrados en la vertical y a la derecha, sin apurar la placa y dejando espacio tanto por encima como por debajo para poder colocar los indicadores. Además, dichos botones se separaron en tres grupos: (i) uno para controlar los focos y el apagado de todas las luces; (ii) otro para encender y apagar las luces de emergencia a sus distintos niveles de intensidad y, (iii) otro para el control de los intermitentes.

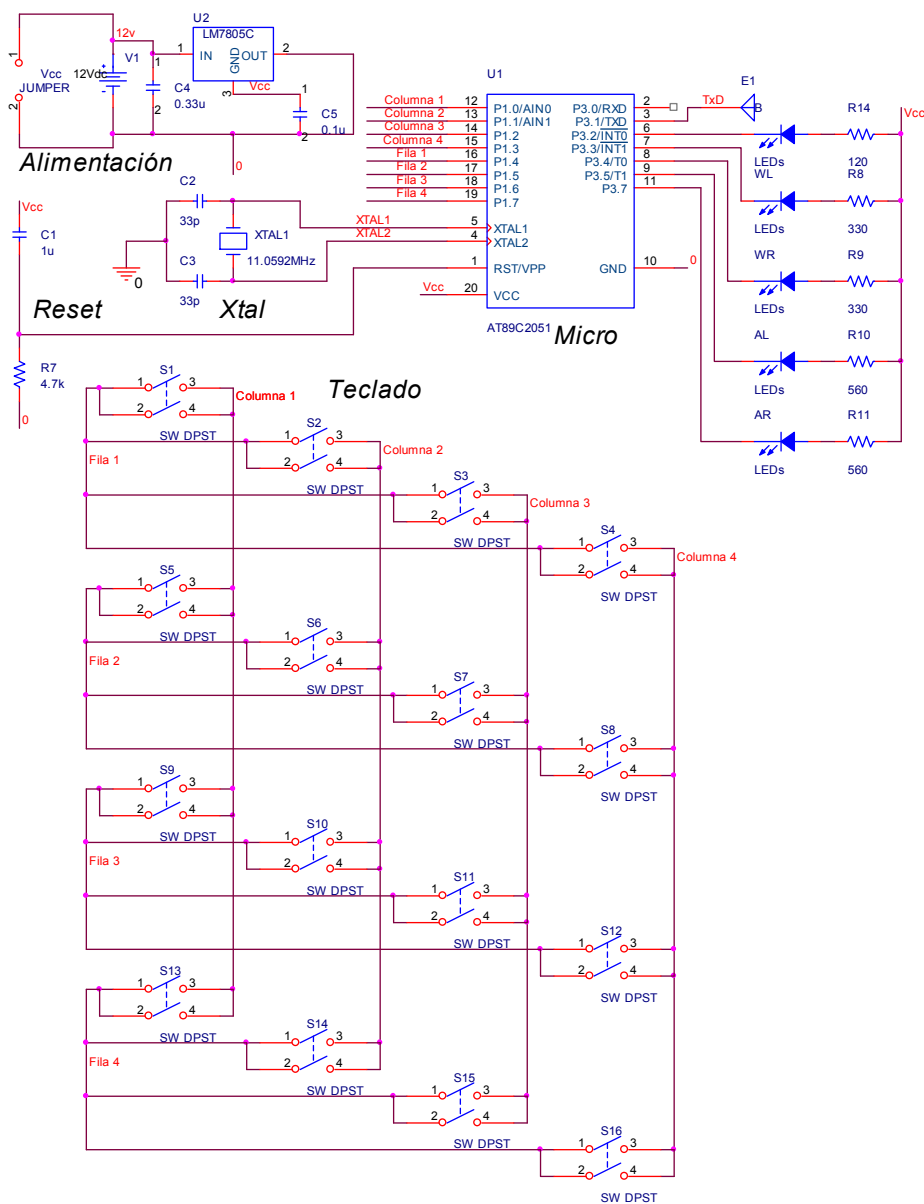


Figura 4.13. Esquema del panel de control del puente de luces.

Los indicadores se colocaron junto a los botones que les atañen y las resistencias que controlan la intensidad que pasa por ellos se dispusieron también lo más cerca posible.

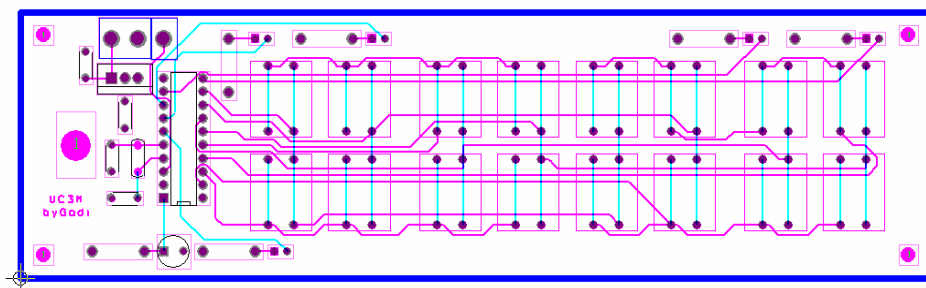


Figura 4.14. PCB del panel de control del puente de luces.

El resto de componentes se colocaron en el poco hueco que quedó entre el interruptor y los botones, poniéndolos en la parte inferior de la placa para que no estorbaran a la hora de cerrar el panel.

Para terminar se diseñaron las pistas del circuito, partiendo de un diseño automático pero terminándolo a mano para evitar algunas vías innecesarias. El mayor problema de esta parte final fue el tener una matriz de 4x4 botones en el circuito pero, dado que los interruptores utilizados eran de agujero pasante, el problema pudo solventarse con relativa facilidad.

4.4 Software de control del sistema visualizador

La programación de los 2 microprocesadores se realizó con el software μ Vision de Keil —compañía adquirida en 2005 por la inglesa ARM—. Ambos códigos fuente se reprogramaron por completo respecto al primer prototipo y se optimizaron en la medida de lo posible. Además, se redujo al máximo el tamaño del programa principal, no solo para que cupiese sin problemas en el nuevo microprocesador, que tan solo posee 2 KiB de memoria ROM, sino para que, en un futuro, se pudiese llegar a grabar en él el código necesario para controlar también un sistema de sonido.

El software μ Vision permite elegir el microprocesador al cual irá dirigido el código y además se le puede pedir, desde la pestaña de salida (*output*) del menú de opciones del objetivo (*Options for Target*), que cree un archivo con el formato HEX de Intel, el cual se puede utilizar para grabar el código en los microprocesadores utilizando un programador como el LabTool-48 —programador universal de Advantech Equipment Corp.—, disponible en el laboratorio del GDAF. Un problema surgido inesperadamente fue que se adquirieron unos microprocesadores AT89S2051 equivalentes a los AT89C2051 pero con mejores prestaciones, los cuales no reconocía el programador. Las posibles opciones para poder grabar dichos microprocesadores pasaban por crear un programador específico a tal efecto o por adquirir un costoso kit de actualización para convertir el programador en un LabTool-48UXP, algo que se podría haber hecho teniendo en cuenta el *firmware* del mismo. Dado que las prestaciones de la versión antigua del microprocesador eran suficientes para cumplir el objetivo, se decidió utilizarlos y desechar los nuevos.

Cabe destacar que si para un futuro se tuviesen que utilizar los nuevos microprocesadores, aparte de necesitar un programador adecuado habría que tener en cuenta sus especificaciones por lo que habría que cambiar el valor de los condensadores que se colocan junto al reloj y también habría que recalcular el valor de las resistencias que limitan la corriente que pasa por los indicadores ya que la intensidad que son capaces de dar estos nuevos microprocesadores es muy inferior a la de los antiguos.

En cuanto a la programación del microprocesador destinado a controlar las luces de emergencia en sí, se comenzó a realizar en C pero visto el tamaño de los archivos que se generaban se optó enseguida por crear un nuevo código, partiendo de cero, en lenguaje ensamblador, el cual permite una optimización de código mucho mayor. De este modo se pudo reducir a menos de la mitad el tamaño del programa para que cupiese en la

memoria del microprocesador. No obstante, el tamaño del archivo no tenía nada que ver con el número de bytes real que sería necesario en la memoria del microprocesador ya que el formato HEX es un formato de texto y al final el tamaño del programa resultó muy inferior a la capacidad disponible. Sin embargo, a pesar de que esta apreciación se hizo mucho antes de terminar el código, pudiendo haber retomado la versión inicial en C, se decidió continuar con la versión en ensamblador para dejar la mayor cantidad de memoria posible libre por si en un futuro se fuese a implementar el sistema de sonido. El tamaño final del archivo en formato HEX fue de 1895 bytes de los cuales se obtuvo una programación de tan solo 677 bytes, 3 bytes más que el programa del mando de control, mucho más sencillo pero realizado en C.

Dado que una de las especificaciones del diseño consistía en que las luces de emergencia se pudiesen utilizar como luces de posición del vehículo, se decidió implementar un control software por PWM de dichas luces, evitando de este modo tener que hacer un hardware específico para tal fin. Teniendo en cuenta los niveles de iluminación establecidos para unas luces de posición se optó por encenderlas con un ciclo de trabajo del 10% mientras no tuvieran que indicar una emergencia. Además, si se quisiera apagarlas del todo tan sólo habría que desconectar todo el sistema de luces con el interruptor general del mando de control. Las Figuras 4.15 y 4.16 muestran el diagrama de flujo en el que se basó el código implementado.

No obstante, el mayor problema que se tuvo que resolver a la hora de realizar este código fue la creación de secuencias de luces de emergencia, ya que se pretendía darle la mayor versatilidad posible al sistema y crear secuencias con distinto número de luces encendido a cada momento para poder iluminar más o menos dependiendo de la luz ambiente o del consumo que se quisiera realizar.

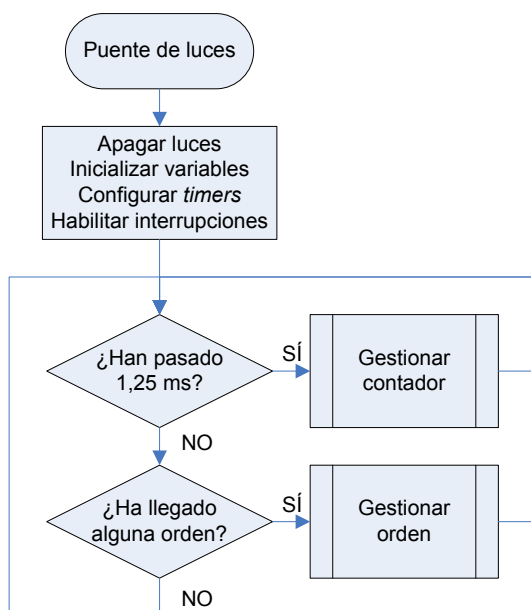


Figura 4.15. Diagrama de flujo del software de control del sistema visualizador.

Así pues, se pensó en la posibilidad de crear secuencias con 2 bloques de luces encendidos a cada instante, 3, 4 ó 5, coincidiendo cada una de ellas con ciclos de trabajo del 20, 30, 40 y 50%, respectivamente, puesto que el número de bloques total del sistema es de 10. La creación de secuencias de un solo bloque se descartó por creer que con sólo 3 LEDs encendidos a cada instante no se podría cumplir el reglamento mientras que la de 5 se tuvo que descartar al final por la restricción del propio reglamento de no admitir ciclos de trabajo superiores al 40% pero se pensó y se desarrolló hasta el final. La creación de secuencias de 2 y de 5 bloques parecía sencilla e intuitiva por ser ambos números submúltiplos del número total de bloques.

Dado que la frecuencia que se quería establecer era de 2 Hz, resultaba necesario poder contar 500 ms en cualquier serie de secuencias, lo que suponía mantener cada una de las 2 secuencias de 5 bloques durante 250 ms frente a los 100 ms que habría que mantener las 5 secuencias de 2 bloques. Sólo con estos datos, parecía claro que sería necesario crear una temporización de 50 ms pero, a pesar de que dicha temporización se podría haber establecido directa y exactamente con el sistema utilizado, además era necesario controlar la intensidad de las luces de emergencia por PWM por lo que se tuvo que hacer una temporización muy inferior con objeto de que el juego de luces tuviese la suficiente inercia como para no verlo parpadear a simple vista. Al final, dicha temporización se fijó en 1,25 ms tras comprobar que a 2,5 ms todavía se podía apreciar el parpadeo de las luces por la PWM.

Es fácil suponer que las series de secuencias de 3 y de 4 luces deberían mantenerse encendidas durante 150 y 200 ms respectivamente para obtener una frecuencia final de 2 Hz. Sin embargo, a pesar de ser cierto, el problema con estas series de secuencias no es su duración sino el hecho de que el número de luces utilizadas en ellas no era múltiplo del número total de bloques de LEDs, lo que se traduce en que cada una de ellas debería mantenerse durante más de una vuelta o ciclo completos. Para entender estos casos es más fácil pensar en las series de 4 bloques de luces ya que, de alguna manera, son como las de 2 bloques pero multiplicadas por dos. Inicialmente, en una serie básica de secuencias, se deberían iluminar 4 bloques consecutivos para, a continuación, apagarlos e iluminar los 4 siguientes bloques. La siguiente secuencia implica apagar estos 4 bloques e iluminar los siguientes pero resulta que los 2 últimos bloques iluminados ya se habían iluminado en la primera secuencia por lo que ya se ha iniciado una segunda rotación y se debe continuar la serie de secuencias hasta haber terminado una rotación exacta sin haber comenzado la siguiente. La serie de secuencias de 4 bloques termina concretamente

cuando se han completado 5 secuencias, tal como se puede observar en la Figura 4.17.

Una vez concluida la serie, habría transcurrido 1 s —200 ms por 5 secuencias— y se habrían completado 2 vueltas por lo que cada vuelta habría durado 500 ms lo que equivale a la frecuencia buscada de 2 Hz.

El caso de 3 bloques iluminados a cada instante resulta parecido pero se necesitan 10 secuencias para completar 3 vueltas con lo que se obtiene igualmente la frecuencia deseada — $3/(10 \cdot 150 \text{ ms}) = 2 \text{ Hz}$.

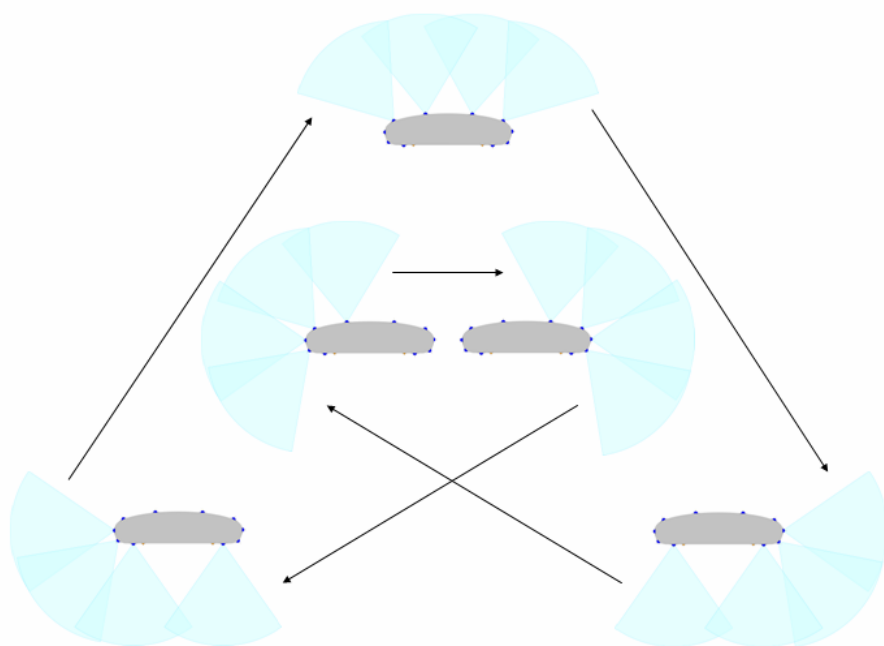


Figura 4.17. Representación de las 5 secuencias básicas de rotación con 4 bloques de luces.

Alcanzado este punto se puede pensar que con tan solo basarse en estas condiciones se podría crear cualquier serie de secuencias de distinto número de bloques. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se está trabajando con bloques discretos de luces tipo flash y que las rotaciones

solamente se están simulando por lo que todavía quedaría determinar alguna consideración a tener en cuenta para que las series de secuencias tuvieran una validez funcional. Las consideraciones que se tuvieron en cuenta a la hora de crear las secuencias fueron dos:

- La primera y más comprensible de ellas es que cada bloque de luces se debe encender en cada serie de secuencias el número de vueltas que conlleve dicha secuencia. Si, por ejemplo, se crease una serie de 4 bloques en la que un bloque sólo se encendiera 1 vez y otro se encendiera 3 veces, dicha secuencia debería descartarse ya que no sería homogénea y, posiblemente, no cumpliera el reglamento en la zona del bloque que se ilumina una sola vez, ya que la iluminación debe cumplir valores mínimos en los 360° alrededor del puente.
- La segunda consideración resulta menos intuitiva y tiene mucho que ver con el hecho de que la rotación se esté simulando. Para ejemplificarla, en la Figura 4.18 se muestra una serie de secuencias de luces que, a pesar de comprender las mismas secuencias que la figura anterior, no sería válida.

Estas secuencias se podrían haber pensado perfectamente para simular una rotación en sentido horario en la que, en vez de iluminarse los 4 bloques consecutivos a los que se apagan, se encendiesen los 4 posteriores a los 2 siguientes a los recién apagados. Sin embargo, tal como se aprecia claramente mirando las Figuras 4.17 y 4.18, la rotación se puede interpretar no en sentido horario sino antihorario, que es lo que ocurriría realmente, dando origen la serie a una rotación con el doble de frecuencia puesto que vista así tan solo completaría una vuelta. No obstante, dicha serie daría el doble de luz de lo normal y podría pensarse

que resultaría igualmente válida pero lo mejor es evitar este tipo de efectos. Para ello se debe tener en cuenta la segunda consideración qué podría resumirse en que “los bloques de luces de las distintas secuencias deben separarse entre sí, de una secuencia a otra, menos bloques de los que les queden para cerrar el círculo”. Así, por ejemplo, en el caso de secuencias de 2 bloques, éstos podrían dejar apagados 1, 2 o 3 bloques entre ellos en el sentido de giro pero no más, puesto que si dejan 4 bloques el efecto sería el de ver una luz rotando con el doble de frecuencia y si se dejaran más ya se vería un giro en sentido contrario al esperado y de distinta frecuencia.

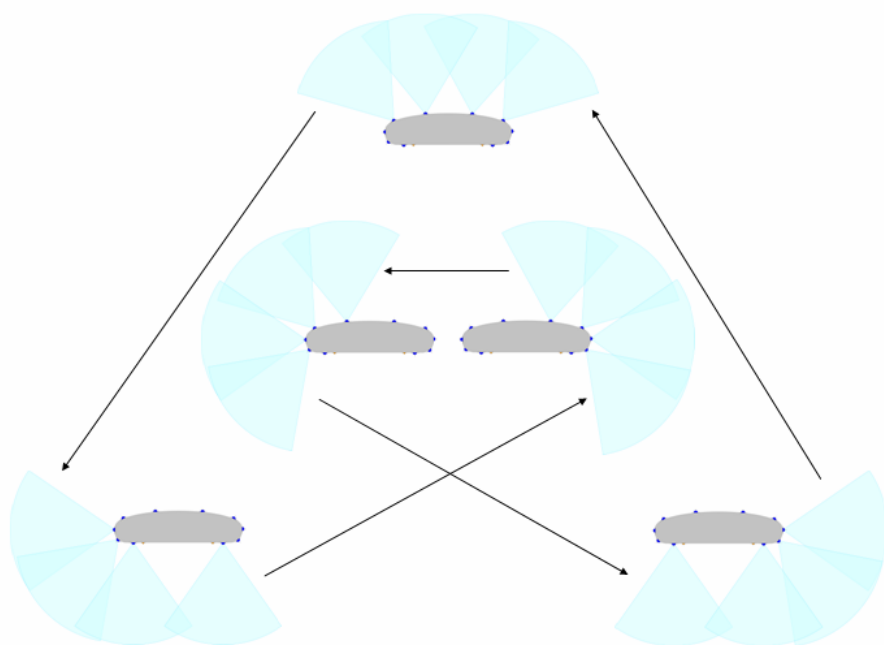


Figura 4.18. Representación de una serie de 5 secuencias de rotación errónea con 4 bloques de luces.

Hay que decir que en la práctica sólo se llevaron a cabo simulaciones de giro en sentido horario, pensando que en este sentido las luces podrían llamar más la atención de los vehículos que se acercasen en

ese sentido y que, en condiciones normales, tendrían preferencia. No se probó ninguna serie “aleatoria” por el engaño que pudiera producir en cuanto a su frecuencia y, al final, las pruebas de homologación se superaron sin ninguna secuencia en concreto sino con todos los bloques de luces encendiéndose y apagándose a la vez por petición expresa del personal del laboratorio de homologación.

Una vez se aclaró como deberían ser las secuencias a programar, se procedió a la programación del código en sí, ya que dichas secuencias se almacenarían en tablas y no afectarían al propio código de programa. Dicho código se creó para poder recibir por el puerto serie las instrucciones que se enviaran desde el mando de control, permitiendo a todas las teclas la doble funcionalidad de encender y apagar la luz o la secuencia de luces correspondiente, así como variar la frecuencia de las luces de emergencia dentro del rango permitido por el reglamento entre 2 y 4 Hz dejando siempre el parpadeo de los intermitentes en torno a los 1,5 Hz, frecuencia central de funcionamiento para los mismos.

La primera versión del programa se pudo terminar antes de la fabricación del prototipo gracias al simulador que incorpora el software μ Vision, que permite depurar el código en su totalidad en ausencia de un hardware funcional tal y como se muestra en la Figura 4.19. Hay que decir que esta primera versión funcionó perfectamente en todo momento y que tan solo se tuvo que modificar para cumplir con las peticiones provenientes del laboratorio de homologación.

La programación del mando de control, que ya de por sí era mucho más sencilla, se simplificó aún más al realizarse en C puesto que todas las condiciones se expresan de forma más sencilla en este lenguaje de programación y fueron bastantes las utilizadas para poder actuar consecuentemente a la pulsación de cada uno de los 16 botones del panel.

Para trabajar con ellos, se les asignaron las letras que se pueden ver en la Figura 4.20.

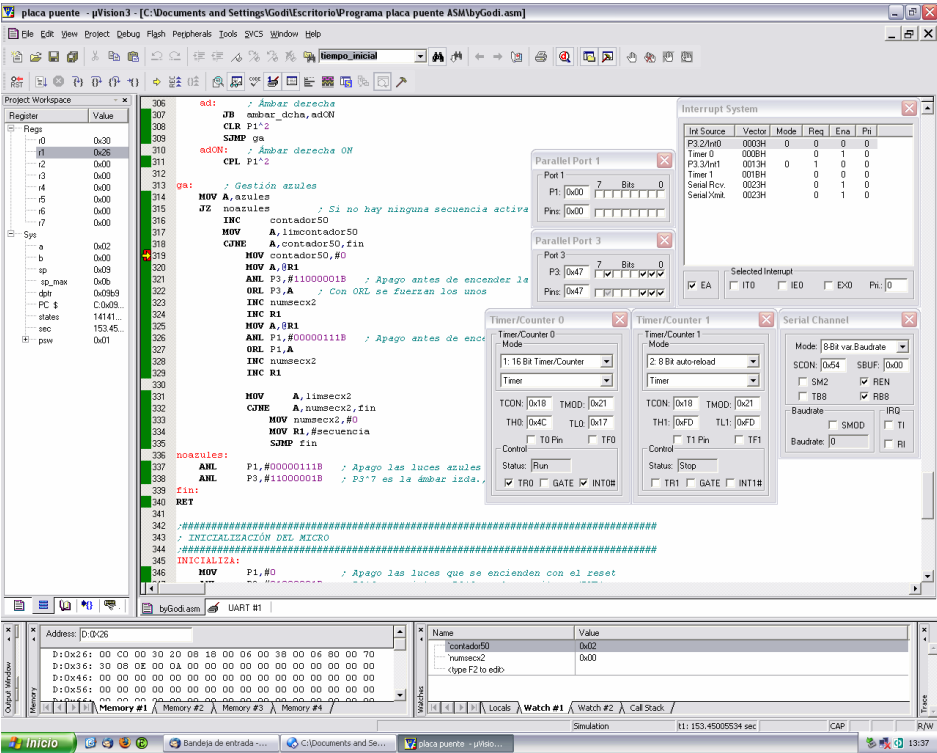


Figura 4.19. Ventana que muestra el simulador de µVision siendo utilizado para depurar código.



Figura 4.20. Prototipo de panel de control con indicadores encendidos y letras asignadas a cada botón.

La función que se le asignó a cada uno de los botones fue la siguiente:

- Botón I: apagado de todas las luces dejando las de emergencia en posición.
- Botón A: encendido y apagado del foco izquierdo.
- Botón B: encendido y apagado del foco derecho.
- Botón J: encendido y apagado de ambos focos.
- Botón G: encendido y apagado del intermitente izquierdo.
- Botón H: encendido y apagado del intermitente derecho.
- Botón O: encendido y apagado sincronizado de ambos intermitentes.
- Botón P: encendido y apagado asíncrono de ambos intermitentes.
- Botones azules: actuación sobre las luces de emergencia.

En principio los botones azules se configuraron para activar y desactivar distintas series de secuencias, las cuales daban una intensidad lumínica proporcional a la posición del botón que actuaba sobre cada una de ellas, aportando menos luz los botones de la izquierda —C y K— y más luz los botones de la derecha —F y N—. Sin embargo, por petición del laboratorio de homologación las secuencias se convirtieron en parpadeos simultáneos de todas las luces y se limitaron a los botones de la fila superior, dejando los botones de la fila inferior para poder variar la frecuencia de los parpadeos entre los 2 Hz —botón K— y los 4 Hz —botón N—. Hay que decir que dicha modificación se pudo realizar en un

tiempo mínimo dado que el programa se realizó pensando en poder efectuar este tipo de modificaciones.

Otra de las funciones del programa es la de activar los LEDs indicadores de las distintas actividades del puente. Dicha activación conlleva el parpadeo de los LEDs de color ámbar así como del LED azul, único para cualquier secuencia de emergencia que se active, a una frecuencia de 2 Hz independientemente de la frecuencia real de las luces del puente de luces por tratarse únicamente de luces informativas pero alternando las luces de color ámbar cuando así se establezca. Por cuestiones de hardware el encendido de los LEDs se tuvo que realizar a nivel bajo.

Además de lo expuesto, el programa se tuvo que hacer para cumplir otras funciones fundamentales que no se cubrieron mediante hardware. Una de ellas fue el control antirrebotes para evitar la detección errónea de dobles pulsaciones en cada botón. Para ello, dado que el número de veces que se puede pulsar un botón por segundo es muy limitado, se optó por establecer una espera entre 100 y 150 ms tras la pulsación de cada botón antes de permitir la lectura de ningún otro. Además, se decidió que la respuesta a una pulsación se daría una vez liberado dicho botón y no cuando se detectara la pulsación en sí por lo que se tuvo que implementar una espera a tal efecto. Para que el envío de la información resultara lo más efectivo posible se decidió trenzar los cables que llevarían la información al puente de luces tal y como se puede observar en la Figura 4.20.

4.5 Montaje y pruebas del sistema visualizador.

Resultados y discusión

El montaje de los dos prototipos necesarios para pasar la homologación se realizó en el laboratorio del GDAF.

Respecto al montaje de las PCBs poco hay que decir. Los únicos problemas que se detectaron vinieron dados, uno por un fallo en el metalizado de los agujeros pasantes de las placas, que se solucionó soldando los componentes implicados por ambas caras, y otro por la excesiva proximidad entre los transistores de la placa del puente de luces. Dicha proximidad se dio como consecuencia de un diseño preliminar de la misma en la que se utilizaban unos transistores con diferente encapsulado. La separación entre ellos no se modificó porque el nuevo diseño habría aumentado el tamaño de la placa y la nueva separación de los transistores no habría coincidido con la separación de los conectores a los que iban unidos por lo que se decidió dejar los transistores en el mismo lugar, obligando a tener que darles distinta inclinación a la hora de montarlo para que no se cortocircuitasen sus drenadores a través de las pestañas dispuestas para la conexión de un radiador a los mismos.

El montaje de los prototipos en sí se vio dificultado en gran medida por las tolerancias de los soportes ya que se fabricaron en metal y los agujeros hechos con láser no eran tan precisos como cabía esperar. No obstante, pudieron limarse para permitir encajar las lentes de los LEDs en ellos y el problema no tuvo mayor importancia.

Los agujeros por donde pudiera entrar agua o suciedad al sistema se sellaron con la misma goma que venía en los puentes originales y el resultado final del montaje se puede observar en la Figura 4.21.

Tras el montaje, los dos prototipos se llevaron a homologar a la Sede Central del Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia (LCOE). Según el primer informe del laboratorio de homologación, los puentes no deberían haber tenido ningún problema para cumplir el Reglamento n.º 65. Tras pequeños ajustes sugeridos por el citado laboratorio y basándose en las hojas de características de los Z-Power LEDs de la serie P4

(Figura 4.22) se pudo superar satisfactoriamente el citado proceso de homologación.



Figura 4.21. Prototipo de puente de luces en funcionamiento.

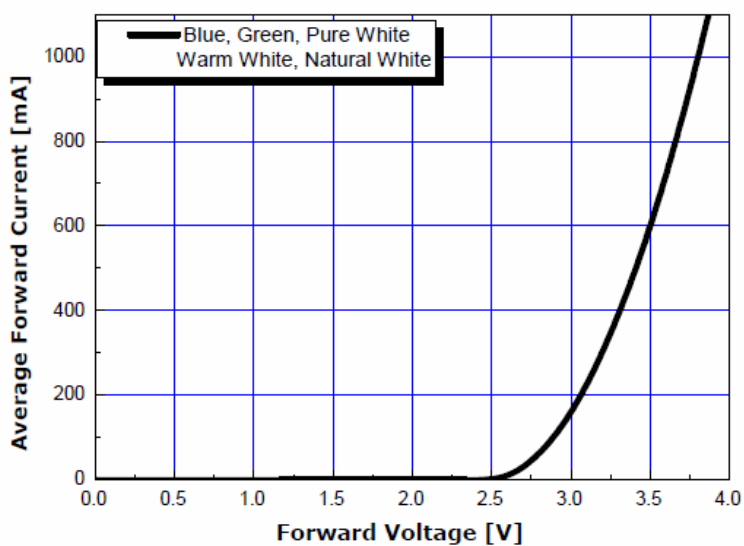


Figura 4.22. Tensión directa de Z-Power LEDs de diferentes colores de la serie P4 frente a la corriente directa media a 25 °C.

Para obtener la relación lineal entre la intensidad que atraviesa los LEDs y la caída de tensión que soportan a partir de 3,25 V, se consideraron los puntos (3,25;0,350) y (3,50;0,600), obteniéndose la relación

$V\gamma = Id + 2,9$, por lo que la nueva intensidad que atravesaría los LEDs se podría obtener directamente a partir de la Ecuación 4.8.

$$Id \cdot Rc = Vcc - Vds - 3V\gamma \quad (4.8)$$

Donde $Vcc = 12 \text{ V}$, $Rc = 2,8 \text{ } \Omega$ y $Vds = 0,29 \text{ V}$, valor obtenido a raíz de introducir en la ecuación los datos siguientes: $Id = 350 \text{ mA}$, $Rc = 5,6 \text{ } \Omega$, $Vcc = 12 \text{ V}$ y $V\gamma = 3,25 \text{ V}$.

Despejando se obtiene un valor de $Id = 519 \text{ mA}$ que corresponde a una tensión de $3,419 \text{ V}$ por lo que se podría deducir que el consumo del sistema debería aumentar un 56%. Sin embargo, el nuevo sistema es más eficiente ya que en él se alcanza un 22,53% menos de pérdidas teóricas en Rc y, por lo tanto, el consumo sólo se ve influenciado por el aumento en un 48,49% de la intensidad con el que se consigue un 37,5% más de flujo luminoso tal y como se puede observar en la Figura 4.23, también extraída de las hojas de características de los LEDs. De cumplirse estas condiciones en la práctica, la potencia que debería poder disipar cada una de las resistencias sería de $0,75 \text{ W}$ — $PRc = 2,8 \cdot 0,5192 \text{ W}$ — pero en realidad Vcc tendría un valor más próximo a los $12,5 \text{ V}$ y no se pondrían 2 resistencias de $5,6 \text{ } \Omega$ en paralelo sino una de $2,7 \text{ } \Omega$ por lo que la intensidad podría alcanzar los 630 mA conllevando un aumento en la luminosidad del 75% y, por lo tanto, unas pérdidas en la resistencia ligeramente superiores a 1 W que deberían ser admisibles puesto que el ciclo de trabajo de las mismas no puede superar el 40%.

En definitiva, se han creado 2 prototipos de puente de luces bajo los términos de una patente nacional en explotación al que, además, se le ha concedido la homologación número 4055 en aplicación del Reglamento n.º 65 por parte de la Dirección General de Industria del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

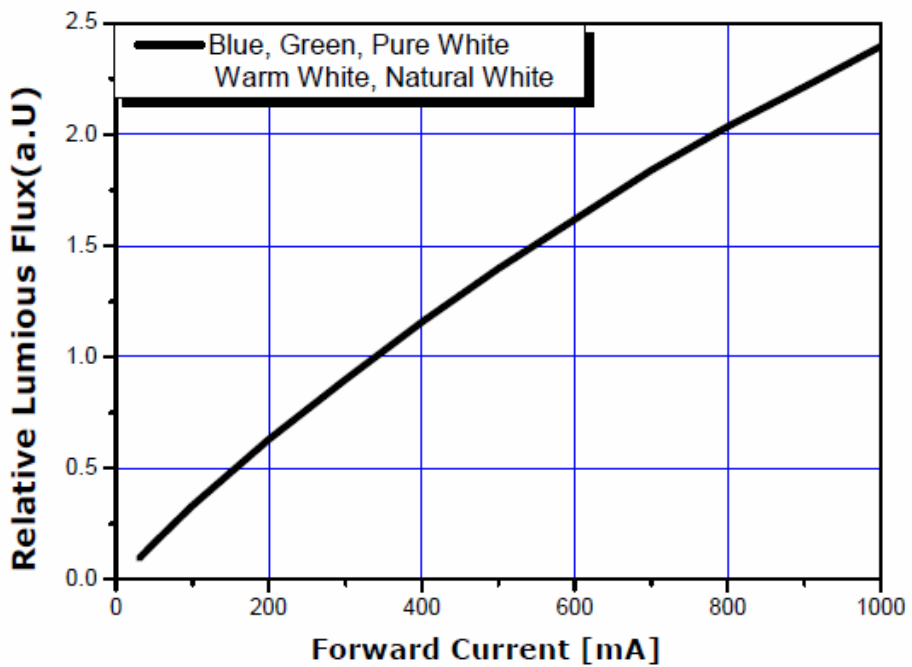


Figura 4.23. Corriente directa de Z-Power LEDs de diferentes colores de la serie P4 frente al flujo luminoso relativo que aportan a 25 °C.

El sistema es funcional, versátil, escalable, de bajo consumo y barato.

Además se han estudiado y desarrollado sistemas para hacer el conjunto más eficiente y para darle un valor añadido pero que finalmente no se han implementado en esta versión por un problema de costes, sistemas que sin embargo sería interesante implementar en versiones futuras del equipo.

5

Conclusiones, trabajos futuros y difusión y transferencia de resultados

Esta tesis abarca el desarrollo de dos sistemas electroópticos conceptualmente diferentes y con ámbitos de aplicación distintos. Se establecerán las conclusiones y trabajos futuros más relevantes para cada uno de ellos y se mostrará la difusión y transferencia de resultados.

5.1 Conclusiones

Por lo que respecta al sistema basado en ventanas PDLC para aplicaciones domóticas, las conclusiones son:

1. Se ha diseñado e implementado un sistema electroóptico novedoso capaz de controlar de forma manual y de forma remota —a través de una aplicación web— varios paneles PDLC, controlando el nivel de transparencia, y por tanto la intensidad de luz transmitida, de forma individual.
2. El control manual de dichos niveles puede efectuarse a través del movimiento de la mano, el cual es detectado por unos sensores de presencia ubicados físicamente próximos al panel.

3. La detección de la dirección del movimiento de la mano por parte de los sensores hace que los paneles cambien su estado de opacidad de mayor a menor grado o viceversa. Este mecanismo parece especialmente indicado para ser utilizado en edificios inteligentes, hoteles, espacios de ocio, etc. donde el factor de la innovación sea un valor añadido diferencial.
4. El sistema permite también su control de forma remota a través de cualquier dispositivo que pueda conectarse a un sitio web, mediante el desarrollo de una aplicación específica desarrollada ad hoc.
5. El sistema aporta una novedad o valor añadido importante frente a los disponibles comercialmente como es la posibilidad de trabajar con varios niveles intermedios de transparencia entre el estado opaco —sin tensión aplicada— y el estado de máxima transmisión —con tensión AC aplicada suficiente para alcanzar la saturación—. Los sistemas comerciales sólo funcionan conmutando entre estados opaco y transparente.
6. El sistema domótico por su concepción e implementación es susceptible de ser transferido al sector industrial de forma rápida y podría implantarse en entornos tales como edificios de oficinas, hoteles, espacios de ocio etc. Este sistema podría ser usado tanto para el control de la luz externa —persianas electrónicas— como para control de privacidad —cortinas o biombos electrónicos.

Por lo que se refiere al sistema visualizador basado en LEDs para vehículos especiales —fuerzas de seguridad, ambulancias, etc.— se pueden destacar las siguientes conclusiones:

1. Se ha diseñado e implementado un dispositivo de señalización flexible, programable y microcontrolado, en el cual se encuentran integrados de forma compacta los sistemas ópticos y acústicos de señalización.
2. A diferencia de los sistemas clásicos basados en elementos mecánicos móviles —luces giratorias— y fuentes de luz de filamento, este sistema está basado en LEDs de última generación y de alta eficiencia, de forma que las secuencias de luces se realizan de forma electrónica sin necesidad de elementos móviles. Esto abarata de forma significativa tanto el coste de fabricación como de mantenimiento del sistema y está más en línea con las directrices y normativas europeas de respeto al medioambiente y eficiencia energética.
3. El sistema se acopla de forma fácil a cualquier vehículo, proporcionando todas las funcionalidades requeridas con un mínimo costo energético y en un mínimo espacio —gracias al diseño mecánico y geométrico realizado—, cumpliendo con las especificaciones normativas relativas a este tipo de dispositivos.
4. El sistema es funcional, programable, escalable, de bajo consumo y barato.
5. El sistema ha sido patentado (ES 2284399B1) y se ha licenciado para su explotación a la compañía Radiotrans.
6. En resumen, se ha completado el ciclo industrial del producto que abarca las fases de diseño —mecánico, electrónico, óptico—, implementación, verificación funcional, patente, homologación y transferencia al sector industrial. Actualmente se encuentra en fase de fabricación con una tirada inicial de 1000 unidades.

5.2 *Trabajos futuros*

Por lo que respecta a trabajos o líneas futuras relativas al sistema domótico cabe citar:

1. Diseñar *drivers* más específicos y eficientes para paneles PDLC de gran área activa. Esto involucraría el uso de sistemas de potencia avanzados ya que el consumo sería ahora un elemento importante que impone restricciones en el diseño del sistema.
2. Aumentar el número de niveles intermedios de transmisión al objeto de obtener un control más fino de la transmisión de luz a través del panel.
3. Adaptar el diseño del sistema para que pueda integrarse en la infraestructura domótica general del edificio y pase a ser un elemento más de la misma.

En cuanto a las líneas futuras del sistema visualizador de vehículos, se pueden citar las siguientes:

1. Desarrollo de la interfaz que permita operar el sistema de forma remota —a través de alguna tecnología *wireless*.
2. Desarrollo de una interfaz software que permita personalizar tanto la secuencia de luces como de sonido.
3. Estudiar la posibilidad de reducir el número de LEDs de alta eficiencia mediante algún sistema óptico auxiliar —lentes de Fresnel, por ejemplo— que permita reducir el consumo, manteniendo la eficiencia y cobertura lumínica del conjunto y, por tanto, manteniendo el cumplimiento con el reglamento o normativa vigente para este tipo de dispositivos.

5.3 *Difusión y transferencia de resultados*

Los siguientes resultados científico-tecnológicos que se describen a continuación están relacionados con los diferentes trabajos desarrollados en esta tesis y abarcan aspectos como el diseño de *drivers* para dispositivos de CL, la caracterización electroóptica y el modelado, el diseño electrónico, la instrumentación electroóptica y los sistemas de adquisición de datos, entre otros.

Los formatos de difusión fueron de varios tipos: artículos en revistas indexadas, comunicaciones a congresos, patentes, exhibiciones en ferias tecnológicas, licencia de la patente a empresa para su explotación, etc.

Artículos en revistas científicas indexadas en JCR:

- C. Vázquez, J.M.S. Pena, S. Vargas, I. Pérez, A.B. Gonzalo, V. Urruchi, R. Vergaz, J. Montalvo, R. Manzanares, J.I. Santos, A.L. Aranda “Displays and Photonics Application Group Activities” (artículo invitado) FIBER INTEGRATED OPT 23 (2-3) 231-247, 2004.
- I. Pérez, J.M.S. Pena, J.C. Torres, R. Manzanares, C. Marcos, C. Vázquez “Optoelectronic Multiplexer for Digital Data Processing based on Liquid Crystal Pixels and Optical Fiber Elements” OPTO-ELECTRON REV 15(2) 78-81, 2007.
- J.M.S. Pena, I. Pérez, J.C. Torres, R. Manzanares, J.M. Otón “Sinusoidal Voltage-Controlled Oscillator based on a Liquid Crystal Cell as Variable Capacitance” JAP J APPL PHYS 46 (10) L221-L223, 2007.

Patente y acuerdo de licencia de patente:

- J. M. Sánchez Pena, Juan Carlos Torres, Rodrigo Manzanares, Isabel Pérez Garcilópez

Título: Dispositivo de Señalización de Vehículos

N. de concesión: ES 2284399B1 País de prioridad: España

N. de publicación: 2284399 Fecha de concesión: 01/01/2009

Entidad titular: Universidad Carlos III de Madrid

Países a los que se ha extendido: España

Empresa que la está explotando: Radiotrans Comunicaciones

- Título del Contrato: Licencia de Explotación de Patente
“Dispositivo de Señalización de Vehículos”

Entidad financiadora: Radiotrans S.A.

Duración desde: 2006 hasta: 2026

Investigador principal: José M. Sánchez Pena

Departamento: Tecnología Electrónica (UC3M)

Número de investigadores participantes: 4

Financiación recibida: 12.000 €

Ferias y congresos:

- J.M. Sánchez Pena, C. Vázquez, I. Pérez, V. Urruchi, R. Vergaz, S. Vargas, A.B. Gonzalo, J. Montalvo, R. Manzanares, J.I. Santos, A.L. Aranda “Research Activities of Displays and Photonic Applications Group” V Infodisplay, Campinas, Brasil, 2002.
- I. Santos, R. Manzanares, C. Vázquez, J.M.S. Pena, “ A Cost-Effective Instrumentation System to Measure Switching Currents of AFLC Displays” OPTOEL’03, Leganés, España, 2003.
- J.M.S. Pena, C. Vázquez, I. Pérez, V. Urruchi, R. Vergaz, J.C. Torres, M.A. Jurado, J.I. Santos, R. Manzanares, “Electro-optical Display Research in the Carlos III University of Madrid” VII Infodisplay, Florianópolis, Brasil, 2004.
- J.M.S. Pena, J.I. Santos, R. Manzanares, V. Urruchi, I. Pérez, J. C. Torres, “Row and Column Drivers for Addressing Full Color and Video Rate Antiferroelectric Liquid Crystal Microdisplays” Microtechnologies for the New Millennium 2005 Symposium: Photonics and Optoelectronics (SPIE) Sevilla, España, 2005.
- V. Urruchi, I. Pérez, J.M.S. Pena, J.C. Torres, R. Manzanares, X. Quintana, J.M. Otón “Liquid crystal materials with asymmetric switching for microdisplay applications” Microtechnologies for the New Millennium 2005 Symposium: Photonics and Optoelectronics (SPIE) Sevilla, España, 2005.

- J.C. Torres, J.M.S. Pena, I. Pérez, V. Urruchi, R. Manzanares, J.I. Santos, “Corrientes de conmutación en células de cristal líquido antiferroeléctrico con respuesta electroóptica asimétrica” OPTOEL’05, Elche, España, 2005.
- I. Pérez, J.M.S. Pena, J.C. Torres, C. Vázquez, R. Manzanares, “Optoelectronic Digital Multiplexer based on Liquid Crystal for Optical Information Systems” LCP Workshop Gante, Bélgica, 2006.
- Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas, “Distintas Tecnologías Ópticas con Control Electrónico al Servicio del Sector Industrial, las Telecomunicaciones y los Discapacitados” Exposición VI Feria Madrid por la Ciencia, Madrid, España, 2005.
- Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas, “Tecnologías Ópticas aplicadas a las Telecomunicaciones y la Discapacidad” Exposición VII Feria Madrid por la Ciencia Madrid, España, 2006.
- J.C. Torres, Carlos Marcos, J.M.S. Pena, I. Pérez, R. Manzanares, “A comparative electrical study of series and parallel resonators based on a nematic liquid crystal cell as variable capacitance” 9th European Conference on Liquid Crystals (ECLC 2007) Lisboa, Portugal, 2007.
- Isabel Pérez, Juan C. Torres, Carlos Marcos, R. Manzanares, José M. Sánchez Pena, “Obtención de la respuesta electro-óptica de dispositivos de cristal líquido antiferroeléctrico a partir de la medida de corriente” OPTOEL’07, Bilbao, España, 2007.

Como información adicional, se listan a continuación los proyectos en los que ha participado el doctorando más ligados a la realización de este trabajo de tesis.

Proyectos y contratos:

- Título del proyecto: Dispositivos Avanzados de Cristal Líquido y de Diodos Orgánicos Electroluminiscentes, Aplicaciones Híbridas para Visión 3D (TEC2009-13991-C02-01)

Duración: 01/01/2010 - 31/12/2012

Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación

IP: Virginia Urruchi del Pozo

Financiación recibida: 117.870 €

- Título del proyecto: Fotónica Aplicada a la Creación de Tecnologías Ópticas y su Transferencia a Empresas (Ref. S-0505/ESP/000417)

Duración: 01/01/2006 - 31/12/2009

Entidad financiadora: Comunidad de Madrid

IP: José Manuel Sánchez Pena

Financiación recibida: 145.000 €

- Título del proyecto: Desarrollo de Pantallas basadas en Cristales Líquidos Antiferroeléctricos y Diodos Orgánicos Electroluminiscentes para Sistemas Portátiles Especializados de Alto Valor Añadido (Ref. TEC2006-13392-C02-01)

Duración: 2006-2009

Entidad financiadora: MEC

IP: José M. Sánchez Pena

Financiación recibida: 157.300 €
- Título del proyecto: Optimización de Ventanas Inteligentes para Aplicaciones Domóticas y Diseño de la Electrónica de Control, Ref. PTR95-0940.01.OP

Entidad financiadora: MEC

Duración, desde: 07/2005 hasta: 07/2007

IP: José M. Sánchez Pena

Financiación recibida: 52.800 €
- Título del proyecto: Helmet-Mounted, Miniature Information Display System (HEMIND)

Entidad financiadora: UE, Ref. IST-2001-37386 (V PM)

Duración, desde: 07/2002 hasta: 06/2005

Investigador responsable: José M. Sánchez Pena

Cuantía de la subvención: 133.536 € (UE, 50% de la financiación total del proyecto total)

- Título del Contrato: Estudio Técnico para la Realización de Puentes de Luces de Señalización con Tecnología de LEDs destinado a los Cuerpos de Seguridad

Entidad financiadora: Radiotrans S.A.

Duración, desde: 2005 hasta: 2005

Investigador principal: José M. Sánchez Pena

Departamento: Tecnología Electrónica (UC3M)

Número de investigadores participantes: 4

Financiación recibida: 3.450 €
- Título del Contrato: Desarrollo de Sistemas Electroópticos Avanzados para Aplicaciones en Seguridad

Entidad financiadora: Radiotrans S.A.

Duración, desde: 2006 hasta: 2009

Investigador principal: José M. Sánchez Pena

Departamento: Tecnología Electrónica (UC3M)

Número de investigadores participantes: 5

Financiación recibida: 18.000 €

Bibliografía

[Agi02] Otros: Agilent Technologies. Manual de usuario [en línea]. <http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/6C0633120A_USERSGUIDE_ENGLISH.pdf> [Consulta: 1 de diciembre de 2009]

[Ale06] ALEJO, I. *Sistema Electroóptico/Acústico de Señalización para Vehículos Especiales I*. Leganés: I. Alejo, 2006. Proyecto de fin de carrera —Ingeniería Técnica en Electrónica— presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

[Bor99] BORN, M.; WOLF, E. *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. 7th Edition, ISBN: 0521642221, 1999.

[Bro95] BROTHERSON, I. D.; CAO, Z.; THOMAS, G.; WEGLICKI, P.; OWEN, J. R. “Counter-electrode films for electrochromic windows”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 39(2-4), 257-270, 1995.

[Chi10] Otros: China Wenzhou AOLE Safety Equipment Co., LTD [en línea]. <<http://www.chinaaole.com/en/about.asp>> [Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Cie31] Otros: CIE. Selected Colorimetric Tables [en línea]. <http://www.cie.co.at/publ/abst/datatables15_2004/CIE_sel_colorimetric_tables.xls> [Consulta: 26 de marzo de 2010]

[Deu09] DEUBENER, J.; HELSCH, G.; MOISEEV, A.; BORNHÖFT, H. “Glasses for solar energy conversion systems”. Journal of the European Ceramic Society, 29 (7), 1203-1210, 2009.

[Esc08] ESCUDERO, L.E. *Diseño e Implementación de un Teclado para el Control de un Puente de Luces*. Leganés: L.E. Escudero, 2008. Proyecto de fin de carrera —Ingeniería Técnica en Electrónica— presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

[Fed09] Otros: Federal Signal Vama. Catálogo de productos [en línea]. <<http://www.fedsig.vama.es/portal/homeProducto.do>> [Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Gom07] GÓMEZ-CHACÓN, R. *Control remoto de una ventana inteligente basada en PDL*. Leganés: R. Gómez-Chacón, 2007. Proyecto fin de carrera —Ingeniería de Telecomunicación— presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

[Gra95] GRANQVIST, C.G. *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*. Elsevier, Amsterdam, NL, 1995.

[Gra00] GRANQVIST, C.G. “Electrochromic tungsten oxide films: review of progress 1993–1998”. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 60, 201, 2000.

[Gra09] GRANQVIST, C.G.; LANSAKER, P.C.; MLYUKA, N.R.; NIKLASSON, G.A.; AVENDAÑO, E. “Progress in chromogenics: New results for electrochromic and thermochromic materials and devices”. Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 93 (12), 2032-2039, 2009.

[Hec97] HECHT, E.; ZAJACT, A. *Optics*. 3rd edition. Addison-Wesley Pub. Co., ISBN: 0201838877, 1997.

[Lee02] LEE, E.S.; DIBARTOLOMEO, D.L. “Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings”. *Sol. En. Mat. Sol. Cells.*, 71, 465–491, 2002.

[Lon08] LONGJIAN MA, YONGXIANG LI, XIAOFENG YU, QUNBAO YANG, CHANG-HO NOH. “Using room temperature ionic liquid to fabricate PEDOT/TiO₂ nanocomposite electrode-based electrochromic devices with enhanced long-term stability”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(10), 1253-1259, 2008.

[Mar06] MARTÍNEZ, S. *Desarrollo de la electrónica de control de un atenuador óptico variable basado en PDLc para redes con fibra óptica de plástico*. Leganés: S. Martínez, 2006. Proyecto fin de carrera —Ingeniería Técnica en Electrónica— presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

[Moh03] MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. *Power electronics, converters, applications and design*. John Wiley & Sons, 2003.

[Mon88] MONTGOMERY, G.P. “Angle Dependent Scattering of Polarized Light by Polymer-Dispersed Liquid-Crystal Films”. *J. Opt. Soc. Am. B*, 5(4), 774-784, 1988.

[Oep09] Otros: OEPM. Dispositivo de señalización de vehículos. [en línea]. <http://www.oepm.es/pdf/2/28/43/2284399_b1.pdf> [Consulta: 26 de marzo de 2010]

[Omr09] Otros: Omron. Catálogo de componentes [en línea]. <http://components.omron.eu/en/products/catalogue/relays/mosfet_relays/default.html> [Consulta: 25 de noviembre de 2009]

[Paj06] PAJARES, M.A. *Sistema Electroóptico/Acústico de Señalización para Vehículos Especiales II*. Leganés: M.A. Pajares, 2006. Proyecto de fin de carrera —Ingeniería Técnica en Electrónica— presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

[Pat09] PATROCÍNIO, A.O.T.; MIZOGUCHI, S.K.; PATERNO, L.G.; GARCIA, C.G.; MURAKAMI IHA, N.Y. “Efficient and low cost devices for solar energy conversion: Efficiency and stability of some natural-dye-sensitized solar cells”. *Synthetic Metals*, 159 (21-22) 2342-2344, 2009.

[Pen98] PENA, J.M.S.; OLÍAS, E.; PÉREZ, I.; RODRÍGUEZ, I.; QUINTANA, X.; OTÓN, J.M. “Propiedades Cromáticas de Dispositivos de Cristal Líquido Disperso en Matrices de Sílice”. En: *proceedings CYTED 98*. Lisboa, Portugal: 1998.

[Pen99] PENA, J.M.S.; PÉREZ, I.; RODRÍGUEZ, Rodríguez; PLANELL, D.; MILLANES, J.; LÓPEZ, F.J.; VÁZQUEZ, C. “Electrically Controllable Privacy PDLC Window for Architectural and Automotive Applications”. En: *IV Workshop on LCD Technology*. Habana, Cuba: 1999.

[Pen01] PENA, J.M.S.; VÁZQUEZ, C.; PÉREZ, I.; RODRÍGUEZ, I.; PLANELL, D.; VARGAS, S. “Control Optoelectrónico en Tiempo Real de la Transparencia de Ventanas PDLC para Aplicaciones Domóticas”. *Mundo Electrónico*, 326, p. 6, 2001.

[Pen02] PENA, J.M.S.; VÁZQUEZ, C.; PÉREZ, I.; RODRÍGUEZ, I.; OTÓN, J.M. “Electrooptic System for On-line Light Transmission Control of PDLC Windows”. *OPT ENG.* 41(7), 1608-1611, 2002.

[Pen06] Otros: Oficina Española de Patentes y Marcas. Patente de invención. Título: Dispositivo de señalización de vehículos [en línea] <http://www.oepm.es/pdf/2/28/43/2284399_b1.pdf> [Consulta: 11 de junio de 2010]

[Per99] PÉREZ, I.; VÁZQUEZ, C.; RODRÍGUEZ, I.; PENA, J.M.S. “Filtros Cromáticos Sintonizables Electrónicamente basados en Dispersiones de Cristal Líquido”. En: *actas URSI'99*. Santiago de Compostela, España: 1999. P. 258-260.

[Per04] MARTÍN PEREDA, J.A. *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicación*. Pearson (1ª edición), ISBN: 8420540080, Madrid, 2004.

[Rae10] Otros: Real Academia Española. Diccionario de la lengua española. Definición de “domótica” [en línea]

<http://buscon.rae.es/draeI/SrvltGUIBusUsual?TIPO_HTML=2&TIPO_BUS=3&LEMA=dom%C3%B3tica> [Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Ric08] VERGAZ, R.; PENA, J.M.S.; BARRIOS, D.; VÁZQUEZ, C.; CONTRERAS, P. “Modeling and Electrooptical Testing of Suspended Particle Devices”. *Sol Energ Mat Sol C*, 92, 1483–1487, 2008.

[Rod00] RODRÍGUEZ, I.; VÁZQUEZ, C.; PÉREZ, I.; PENA, J.M.S. “Transparencia Controlable en Ventanas de Dispersiones de Cristal Líquido (PDLC/GDLC) mediante Modulación de Frecuencia de la Señal de Excitación”. En: *URSI '00*. Zaragoza, España: 2000.

[Ron10] Otros: Rontan Eletro Metalúrgica Ltda. Catálogo de productos [en línea].<www.rontan.com.br/prod_adap.asp?id_prod_gr=8> [Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Rui10] Otros: Ruian Huadun Security Equipment co., LTD [en línea]. <<http://www.v8cn.com/police/about.asp?tid=10>> [Consulta: 31 de mayo de 2010]

[She10] Otros: Shenzhen UAU Electronics.,LTD [en línea]. <<http://www.uau-led.com/about.html>> [Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Sou10] Otros: SoundOff Signal. Catálogo de productos [en línea].
<www.soundoffinc.com/indexpages/warnamber/lightbars_index.htm>
[Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Str10] Otros: Nova Electronics. Catálogo de productos [en línea].
<www.strobe.com/component/option,com_virtuemart/Itemid,32>
[Consulta: el 31 de mayo de 2010]

[Une58] Otros: UNECE. Addenda to the 1958 Agreement (Regulations 61 - 80) [en línea].
<<http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs61-80.html>>
[Consulta: 26 de marzo de 2010]

[Ver04] VERGAZ, R.; PENA, J.M.S.; VÁZQUEZ, C.; MECERREYES, D.; POMPOSO, J.A. “Nuevos Materiales Electrocrómicos para Aplicaciones Fotónicas y Domóticas de Valor Añadido. Introducción y Funcionamiento”. Mundo Electrónico 349, p. 5, 2004.

[Ver08] VERGAZ, R.; BARRIOS, D.; PENA, J.M.S.; POZO-GONZALO, C.; SALSAMENDI, M.; POMPOSO J.A. “Impedance Analysis and Equivalent Circuit of an All-plastic Viologen Based Electrochromic Device”. Displays, 29, 401-407, 2008.

[Wik10] Otros: Enciclopedia libre Wikipedia. Artículo sobre “domótica” [en línea]. <<http://es.wikipedia.org/wiki/Dom%C3%B3tica>>
[Consulta: 31 de mayo de 2010]

[Wil74] WILLIAMS, J. RICHARD. *Solar energy, technology and applications*. Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, Michigan, 1974.

[Wu87] WU, B.G.; WEST, J.L.; DOANE, J.W. “Angular Discrimination of Light Transmission through Polymer-Dispersed Crystal Films”. *J. Appl. Phys.* 62(9), 3925-3931, 1987.

[Zum86] ZUMER, S.; DOANE, W. “Light Scattering from a Small Nematic Droplet”. *Phys. Rev. A.*, 34(4), 3373-3386, 1986.

[Yu97] YU, B.S.; KIM, E.S.; LEE, Y.W. “Developments in suspended particle devices (SPD)”. En: C.M. Lampert, C.-G. Granqvist, M. Gratzel, S.K. Deb (Eds.), XV Proc. SPIE 3138 217–226, 1997.